

Université de Montréal

**L'apport des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux en
architecture : une analyse selon les modèles de la tectonique
numérique d'Oxman**

Par Housseem Eddine Mnejja

Faculté de l'aménagement

Mémoire présenté
en vue de l'obtention du grade de M. Sc. A en Aménagement

Août 2016

© Mnejja, 2016

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

L'apport des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux en architecture : une
analyse selon les modèles de la tectonique numérique d'Oxman

Présentée par :

Houssein Eddin MNEJJA

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Anne Marchand, président-rapporteur

Juan Torres, directeur de recherche

Manon Guité, co-directrice de recherche

Albert Lejeune, membre du jury

Résumé

Les moyens numériques ont transformé les pratiques en architecture notamment en facilitant la continuité des flux d'information entre la conception et la fabrication. À travers ce mémoire, nous explorons les contributions possibles de ces moyens dans un contexte de pénurie d'artisans et de perte de savoir-faire artisanaux en architecture.

Nous nous sommes appuyés sur les modèles de la tectonique informée pour la conception à base des matériaux, documentés par R. Oxman (2014), qui regroupent un ensemble d'approches et d'outils numériques, afin d'étudier, dans un premier temps, les apports et limites de ces derniers à partir de plusieurs cas expérimentaux; c'est-à-dire expérimental. Ainsi, nous avons pu identifier certains savoir-faire artisanaux dont le déclin est possiblement compensable par les moyens numériques. Dans un deuxième temps, nous avons décelé les contributions des moyens numériques dans un projet à partir de l'analyse des exemples de la construction de la Sagrada Familia et la restauration du parlement canadien à Ottawa.

Les principaux résultats de notre recherche sont :

- Nous avons distingué que la modélisation paramétrique est plus adaptée au processus de conception tandis que la modélisation à base de relevés est plus appropriée pour la production des répliques.
- Les outils numériques de fabrication permettent d'employer plusieurs types de matériaux. Elles assurent une rapidité et une précision dans la réalisation des artefacts. Cependant, l'intervention des artisans demeure incontournable dans la majorité des cas.

Les moyens numériques ont un grand potentiel pour compenser la perte des savoir-faire artisanaux et pour développer de nouveaux processus créatifs. Toutefois, à ce jour, ils se limitent au rôle d'assistants et devraient être perfectionnés.

Mots-clés : Savoir-faire artisanal ; architecture ; moyens numériques ; modèles de la tectonique informée ; modélisation paramétrique ; outils de fabrication numériques.

Abstract

Digital tools have transformed the architectural practices due to the information flow continuity between design and manufacturing. Through this these, we explore their possible contributions in the context of artisans' shortage and craft skills' losses in architecture.

We relied on informed tectonic models of materials based design, documented by R. Oxman (2014), which combines a variety of digital approaches and tools to study their contributions and limits based on multiple case studies. Thus, we identified some craft skills whose decline is possibly compensated by digital tools. Then, we analyzed the digital tools' contributions in a project based on the Sagrada Familia and Canadian parliament examples.

The main results of our research are:

- Digital in architecture is based on digital models. The parametric approach is more suited to design process while models based on lasergrammetry and photogrammetry surveys are more appropriate for replica production.
- Digital manufacturing tools allow the use of several materials types. Similarly, they provide speed and accuracy. However, the artisans' participation remains unavoidable in most cases.

Digital media have great potential to overcome the craft skills' loss and even exploit them in new creative processes. However, to date, they are limited to the role of assistants and should be perfected.

Keywords: craftsmanship skills, architecture, digital tools, materialization models, parametric modelling, robotics arms.

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des sigles.....	xi
Remerciements	xiii
Première partie : contexte, problèmes et hypothèses.....	1
Introduction.....	1
1 Savoir-faire artisanal en architecture : définitions, problèmes et enjeux.....	4
1.1 Savoir-faire	4
1.2 Savoir-faire artisanal en architecture : aperçu historique et définitions	5
1.3 Savoir-faire artisanal en architecture, entre déclin et nécessité	7
1.4 Conclusion	11
2 Moyens numériques et transformation en architecture : vers une quête de la matérialité	12
2.1 La modélisation.....	12
2.1.1 Modélisation paramétrique	13
2.1.2 La modélisation par le relevé.....	14
2.2 Outils numériques de fabrication.....	16
2.2.1 Les machines à contrôle numérique (CNC).....	16
2.2.2 Les imprimantes 3D.....	17
2.2.3 Les bras robotisés.....	19
2.3 Les approches de matérialisation par le numérique en architecture ; les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux	21
2.4 Conclusion	23
3 Question de recherche, objectifs et approche méthodologique	25
3.1 Question et objectifs	25
3.2 Approche méthodologique.....	26
3.2.1 Opérationnalisation de la recherche.....	26
3.2.2 Standards de qualité, apports et limites de l'approche méthodologique.....	28
3.3 Conclusion	28

Deuxième Partie : analyses de cas	30
4 Analyses des approches numériques de matérialisation dans un milieu contrôlé	30
4.1 La tectonique informée pour conception à base de matériaux en architecture	30
4.1.1 Le modèle de rationalisation	30
4.1.2 Le modèle des flux de la conception à la production.....	34
4.1.3 Modèle de la fabrication robotisée personnalisée	38
4.1.4 Modèle des propriétés variables des matériaux	45
4.2 Interprétation et conclusions	52
4.2.1 Moyens numériques et savoir-faire artisanaux	52
4.2.2 Le croisement des modèles de tectonique informée pour la conception à base de matière.....	54
4.2.3 Modèles des processus numériques en architecture.....	56
4.2.4 Apports et limites des moyens numériques pour les savoir-faire artisanaux en architecture dans un milieu expérimental	57
5 Analyse de cas dans le contexte de projet.....	59
5.1 Sagrada Familia	59
5.1.1 Les colonnes de la nef centrale	60
5.1.2 La Rosace.....	66
5.1.3 Interprétations et conclusion	72
5.2 Le parlement canadien	73
5.2.1 Mise en contexte	73
5.2.2 Réinterprétation du savoir-faire artisanal par les moyens numériques	74
5.2.3 Analyse de cas: The owl and thistle.....	75
5.2.4 Interprétations et conclusions	79
5.3 Conclusion	80
5.3.1 Modèles de matérialisation des savoir-faire artisanaux en architecture dans le contexte de projet.....	80
5.3.2 Les types des processus de la matérialisation des savoir-faire artisanaux dans un projet	82
5.3.3 Contributions des moyens numériques	82
6 Conclusion générale.....	84

6.1.1	Principaux résultats de la recherche.....	84
6.1.2	Les modèles de matérialisation par le numérique et savoir-faire artisanaux	84
6.1.3	Apports des moyens numériques	87
6.1.4	Obstacles à l'utilisation des moyens numériques	88
6.1.5	Relativité des modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux.....	89
6.2	Limites de la recherche	89
6.3	Perspectifs de développement :.....	90
	La réinterprétation et réintégration des savoir-faire artisanaux	90
	Mener des recherches sur la base des données primaires	90
	Perfectionnement de la technologie	91
	La relation Homme-Machine :.....	91
6.4	Pour finir	91

Liste des tableaux

Tableau I : Métiers et savoir-faire artisanaux liés à l'architecture et la restauration en voie de disparition (ARTisanat.ch, 2011).....	10
Tableau II : Moyens numériques, nature de processus et savoir-faire artisanaux en architecture. (© Mnejja 2016)	53
Tableau III : Affiliation des cas analysés aux modèles tectoniques informés (© Mnejja 2016)	56
Tableau IV : matérialisation des savoir-faire artisanaux en architecture dans le contexte de projet. (© Mnejja 2016)	81
Tableau V : Affiliation des cas analysés aux modèles tectoniques informés (© Mnejja 2016)	86

Liste des figures

Figure 1 : Le savoir-faire artisanal en architecture par rapport à la notion du savoir-faire (© Mnejja 2016).....	7
Figure 2 : « Europe montant le taureau » : modèle numérique à partir de l’ortho-photo et les images « raster ». (BEGRICHE, 2003).	14
Figure 3 : Exemple de photogrammétrie architecturale multi-image, l’hôtel de ville de Zürich. (Fuchs, 2006).	15
Figure 4 : (à gauche) le capteur « SOISIC » de MENSI ; (à droite) Segmentation (salle capitulaire, Figeac), MAP — CRAI Nancy (Fuchs, 2006).....	15
Figure 5 : Méthodologie générale de relevés numériques et modélisation 3D (Fuchs, 2006)..	16
Figure 6 : En haut usinage d’éléments par des machines CNC : en bas à gauche, le projet de « Nine Bridges Golf club », à droite le « Kilden performing arts center ». (DESIGN-TO-PRODUCTION, 2010)	17
Figure 7 : Exemple d’outil développé par « artisengineering » qui comprend un support pour le fil en résine (Artisengineering, 2015)	18
Figure 8 : (à gauche) exemple de dispositif pour impression STL (à droite) le modèle titulaire du « SCI-Arc Gehry Prize » (capture d’écran) (SCI-Arc, 2012).....	18
Figure 9 : Interface de Kuka PRC (© Mnejja, 2016).....	20
Figure 10 : Stratégie générale de recherche (© Mnejja 2016).....	29
Figure 11 : à gauche la géométrie des pavillons de la tour Eiffel conçus par des panneaux cylindriques. À droite la même approximation réalisée par des bandes pliées avec un plus grand angle de tolérance (Pottmann et al., 2015, p. 19).....	31
Figure 12 : Modélisation, segmentation et découpage (Trummer et al., 2013, p. 115)	32
Figure 13 : Traçage et montage des pierres composant une arche.(Beth, 2007, p. 49)	32
Figure 14 : Usinage et assemblage (virtuel) de l’arche (Trummer et al., 2013, p. 113 & 117)	33
Figure 15 : (à gauche) exemple d’outils artisanaux de taille des pierres (à droite) un artisan en train de tailler une pierre (Beth, 2007, p. 48 & 49).....	33
Figure 16 : Montage artisanal d’un arc (Beth, 2007, p. 59).....	34
Figure 17: À gauche, “The stacked pavilion”; à droite, “the sequential structure” (F. Gramazio, 2014b)	35

Figure 18 : Des petites maquettes d’esquisses de « séquentielle structure » (F. Gramazio, 2014b)	36
Figure 19 : À gauche, interface de logiciel Rhino déployé pour étudier les modèles numériques ; à droite. le bras robotisé UR5 (F. Gramazio, 2014b)	37
Figure 20 : Les différents outils de fabrication (bras robotisés et accessoires) (F. Gramazio, 2014b).	37
Figure 21 : À gauche, Élévation ; à droite, vue intérieure (F. Gramazio, 2014a).	38
Figure 22 : Source d’inspiration (la caisse des raisins) (F. Gramazio, 2014a)	39
Figure 23 : Dispositifs robotisés utilisés ; à gauche bras robotisé à 6 axes installés sur rail ; à droite, Gripper et applicateur de liant (F. Gramazio, 2014a).	39
Figure 24 : (à gauche) couvrement losangé du mur en brique (Patrimoine-histoire, 2008) ; (à droite) motif en briques à Touzeur (Tunisie) (Service-protestant-de-mission, 2014).	40
Figure 25 : Conversion des niveaux de gris en un schéma (pattern) ; l’image est recrée à travers la densité des lignes (King et al., 2014).	41
Figure 26 : (à gauche) simulation de processus de réalisation ; (à droite) placement des carreaux de céramiques par le bras robotisé (King et al., 2014).	41
Figure 27 : Étapes et outils nécessaires pour la réalisation d’une mosaïque romaine (Crépeau, 2010).	42
Figure 28 : Techniques de sculpture et moulage d’une colonne (Clifford et al., 2014)	43
Figure 29 : Dispositifs robotisés équipés de couteaux chaud « hot-knife » (Clifford et al., 2014)	43
Figure 30 : Création de moules et reproduction d’objets par la technique de « Moule Bateau » (Rêve-de-pierre, 2006).	44
Figure 31 : Processus de fabrication artisanale d’une moulure en plâtre (Beth, 2007, p. 40) ..	44
Figure 32 : À gauche : la buse d’extrusion, au milieu : détail, à droite : impression libre de structure (N. Oxman et al., 2013)	45
Figure 33 : En haut la buse pneumatique, en bas droite : modèle imprimé à l’échelle humaine, à gauche : niveau de précision (Duro-Royo et al., 2015).	46
Figure 34 : Exemple d’équipement pour impression en métal (Source : Joris Laarman Lab) cité par (Browell, 2014)	47

Figure 35 : L'impression métallique permet d'optimiser les matériaux et réaliser des structures solides et légères (Warton et al. 2014, pp. 151-152).	47
Figure 36 : Schémas et esquisse du pont (MX3D, 2014)	48
Figure 37 : Simulation de la proposition ; deux bras robotisés impriment un pont métallique à Amsterdam (MX3D, 2014).	49
Figure 38 : Dispositif robotisé utilisé (idem)	49
Figure 39 : Réduction en bas fourneaux adapté de (Les-Forges-de-Montréal, 2011, p. 4)	50
Figure 40 : Réalisation d'une volute à noyau (Les-Forges-de-Montréal, 2011, p. 32)	51
Figure 41 : Modèle général de la matérialisation des savoir-faire techniques en architecture et en construction (© Mnejja, 2016)	57
Figure 42 : À gauche, modèle en plâtre de la nef centrale ; à droite, le modèle en plâtre original réalisé par Gaudi de la nef centrale à l'échelle 1/10 (Halabi, 2015, p. 90).	61
Figure 43 : Principe conceptuel des éléments avec balayage en double hélice (Halabi, 2015, p. 91).	61
Figure 44 : À gauche, les différentes sections d'une colonne (Halabi, 2015, p. 91) ; à droite, adaptation de la partie supérieure des colonnes (Alsina i Català et al., 2004, p. 20).	62
Figure 45 : Décomposition d'une colonne (Alsina i Català et al., 2004, p. 20)	63
Figure 46 : À gauche, Assemblage des prototypes en gypse des composants d'une colonne ; au milieu, simulation d'usinage ; à droite, la sculpture d'un composant monolithique (Alsina i Català et al., 2004, pp. 22-26-27).	63
Figure 47 : Vue intérieure de la nef centrale de la basilique (Alsina i Català et al., 2004, p. 27)	64
Figure 48 : À gauche, la colonne Lleda ; à droite, Sculpture d'une colonne de la façade par un bras robotisé (Halabi, 2015, pp. 93-95).	64
Figure 49 : Processus de matérialisation des colonnes de la Sagrada Familia (© Mnejja, 2016)	65
Figure 50 : À gauche, photo d'une esquisse originale de Gaudi ; à droite, des maquettes en plâtre réalisées dans les années 1970s (Burry et al., 2001, p. 78)	67
Figure 51 : Modèle paramétrique de la fenêtre réalisé par le logiciel (CADD5) (Burry et al., 2001, p. 79)	67
Figure 52 : Modèle 3D de la Rosace (Burry et al., 2001, p. 81)	68

Figure 53 : À gauche, Manuel Mallo (sculpteur) et Jordi Fauli (architecte) avec un prototype ; à droite, des prototypes rapides et un modèle numérique de pierre sculpté (Burry et al., 2001, pp. 81-83).....	69
Figure 54 : Une photo démontrant la précision des éléments réalisés selon des dispositifs numériques (Burry et al., 2001, p. 85).	70
Figure 55 : À gauche, Manuel Mallo près d'un élément typique en pierre ; les quatre colonnes constituant la base de la Rosace ; à droite, un composant de la Rosace (Burry et al., 2001, p. 84).	70
Figure 56 : Processus matérialisation d'une manière créative et réalisation entièrement artisanale (l'exemple de la Rosace - Sagrada Familia) (© Mnejja 2016)	72
Figure 57 : « pointing machine » utilisée dans l'atelier du sculpteur de Dominion (Hayes et al., 2014, p. 645)	74
Figure 58 : La sculpture endommagée (Hayes et al., 2014, p. 647)	75
Figure 59 : Le prototype en polystyrène avec les « réparations » en argile (Hayes et al., 2015, p. 101)	76
Figure 60 : Le modèle numérique incluant les réparations, réalisé par les sculpteurs (Hayes et al., 2014, p. 648).	76
Figure 61 : La sculpture en pierre avant l'intervention des sculpteurs (Hayes et al., 2015, p. 102).	77
Figure 62 : La surface de la sculpture après l'intervention des artisans-sculpteurs.(Hayes et al., 2015)	77
Figure 63 : Processus de reproduction de copie de sculpture avec l'intervention d'artisans. ..	79

Liste des sigles

CMAQ : Conseil des métiers d'art du Québec

Machine CNC : Machine à contrôle numérique/Computer numerical control

CAD: computer aided design.

CAM: computer-aided manufacturing.

BIM: Building Information Modelling.

FDM: Fusion deposition modeling);

STL : stéréolithographie

ETH Zurich : école polytechnique fédérale de Zürich

ICD: institute for computational design.

UR : Universal Robots.

GRCAO : Groupe de recherche de conception assistée par ordinateur.

TU Graz : université technique de Graz

*À mes parents Lilia et Majid qui m'ont montré la voie vers le succès et l'excellence
et à mes professeurs et amis qui m'ont accompagné.*

Remerciements

Ma profonde gratitude, d'abord, à mes directeurs de recherche Juan Torres et Manon Guité pour leurs discussions constructives et inspirées sur le sujet de mon mémoire, pour les consignes justes et claires, pour le support inconditionnel et de tout type et pour l'attitude de collaboration dans cette expérience.

Je remercie également Anne Marchand et Albert Lejeune pour leur remarques critiques et constructives.

Mes remerciements vont à mon professeur, Temy Tidafi qui m'a accompagné, conseillé, inspiré et soutenu tout au long de mon parcours au GRCAO.

Merci également à Ivanka Iordanova, une amie qui n'a cessé de me soutenir et conseillé.

Pendant cette expérience j'ai eu la chance de collaborer avec des personnes intéressantes, merci à Roger Bruno Richard, Irena Latek, Omar Bakar, Jacques Lachapelle, Tiiu Poldma, Danielle Dagenais, Michel Max Raynaud, Valérie Mahaut, Paul Lewis, Thomas Balaban.

Merci à tout le personnel de la Faculté d'aménagement, un grand merci à Simone Zriel, Mirlande Félix et Carl L'Archevêque.

Merci à tous mes amis et aux membres de ma famille, particulièrement mes sœurs Sameh et Syrine, pour leurs appuis et encouragements.

Enfin, je dois toutes mes réussites dans cette vie à mes parents Majid et Lilia qui n'ont jamais épargné les moyens et les efforts pour me soutenir à atteindre mes objectifs.

Première partie : contexte, problèmes et hypothèses

Introduction

Les progrès technologiques et l'industrialisation ont transformé les modes de vie, de production et les modèles économiques. Ces changements ont eu des impacts sur l'architecture, entre autres, en suscitant l'essor de nouveaux métiers et causant le déclin de certains savoir-faire dits « artisanaux » transmis depuis plusieurs générations (Le Maléfan, 2014). Cette situation pourrait engendrer un manque de main-d'œuvre et de compétences nécessaires pour la restauration et l'entretien de monuments patrimoniaux et historiques.

Bien que cette nouvelle circonstance ait mis plusieurs métiers artisanaux en péril, un bon nombre d'entre eux, d'après Luc Delavigne¹, « *ont su évoluer avec le temps notamment avec l'utilisation du numérique* » (Le Maléfan, 2014). Alors, il est possible d'imaginer que les nouvelles technologies, particulièrement les outils numériques de modélisation et de fabrications en architecture (CAD/CAM)², pourraient présenter une solution à la rareté des artisans et la disparition de leurs métiers et savoir-faire artisanaux (idem). L'exemple de la Sagrada Família (Burry, 2013) à Barcelone, témoigne des contributions possibles du numérique pour surpasser ces difficultés. C'est un cas où les moyens numériques ont permis de résoudre des problèmes de conception et fabrication des formes à géométrie complexe en réduisant les coûts et les délais (Halabi, 2015) dans une conjoncture où la main-d'œuvre spécialisée est devenue rare ou inexistante.

Nous nous posons la question suivante pour orienter notre recherche :

¹ Président du conseil des métiers d'art du Québec (CMAQ)

² (CAD/CAM): computer-aided design and manufacturing.

« Comment les moyens numériques permettent-ils de reproduire certains procédés ou artefacts artisanaux en architecture, et quelles sont leurs caractéristiques selon les modèles de la tectonique numérique proposés par Oxman? »

Notre but est d'explorer les possibles contributions des moyens numériques et les façons par lesquelles ils peuvent compenser une éventuelle perte des savoir-faire artisanaux, en scrutant leurs apports. C'est-à-dire, énumérer les manières de reproduire certains procédés ou artefacts artisanaux en architecture.

Dans notre recherche, nous considérons l'architecture comme une activité englobant la définition des formes, la caractérisation des espaces, la maîtrise et la prescription des procédés constructifs. Nous entendons par moyens numériques l'ensemble des approches, méthodes, processus et outils permettant d'atteindre un objectif en utilisant l'informatique. Dans notre cas, les moyens numériques comprennent les approches de modélisation et de conception, particulièrement la modélisation paramétrique, en plus des technologies de fabrication. Enfin, les savoir-faire artisanaux englobent les processus, les techniques, les secrets, etc. nécessaires à la caractérisation et la fabrication d'un objet artisanal. Nous étudions ce concept en détail au cours du prochain chapitre.

Dans ce mémoire, nous identifions les raisons du déclin du savoir-faire « artisanal » et nous explorons les possibles contributions des nouvelles technologies pour atténuer ses effets négatifs. Notre démarche prend appui sur l'analyse d'exemples d'utilisation des moyens numériques en milieu contrôlé (expérimental) et l'analyse de cas dans le contexte de projet.

Nous organisons notre mémoire en trois parties. Dans la première, nous caractérisons, en premier lieu, la notion de savoir-faire artisanal en expliquant les raisons de son déclin. En second lieu, nous exposerons un état de l'art des moyens numériques relatif aux outils de modélisation, de fabrication et aux modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux proposés par R. Oxman (2014). En dernier lieu, nous énoncerons les questions, les objectifs et l'approche méthodologique de notre recherche.

La deuxième partie de ce document comporte deux volets. Le premier illustre plusieurs exemples d'application avérée des moyens numériques en architecture. Ce volet nous permettra d'énumérer les savoir-faire dont il est possible de compenser la perte, les approches, processus

et outils numériques déployés en outre de leurs contributions probables aux savoir-faire artisanaux. Le second volet est consacré à étudier l'emploi des moyens numériques dans un contexte de projet en cherchant à explorer comment ils ont été utilisés pour contourner la rareté d'artisans de certains métiers. À cet égard, nous nous attardons sur les cas de la construction de la Sagrada Familia, à Barcelone et le projet de restauration du parlement canadien à Ottawa.

La dernière partie est consacrée à la présentation des résultats, des conclusions, des apports, des limites et des pistes de développement de notre recherche.

1 **Savoir-faire artisanal en architecture : définitions, problèmes et enjeux**

Notre recherche s'articule autour du concept du savoir-faire artisanal en architecture. Dans ce chapitre, nous le définissons en le situant par rapport à celui de savoir-faire en général. Ensuite, nous présentons son importance et les défis auxquels il est confronté.

1.1 **Savoir-faire**

« L'homme est intelligent avec ses mains » Aristote.

La littérature scientifique fait une nette distinction entre les connaissances explicites « formalisées » et les savoir-faire « tacites ». Ces derniers sont personnels, intériorisés, relativement inaccessibles et appréciables uniquement par leurs résultats (Deforge, 2006). Ils englobent les capacités de juger, de choisir et d'anticiper les conséquences d'une décision. Ils sont transmis par l'observation, les paroles et l'entraînement (Charbonneau, 2009). Un apprenti continue à perfectionner et développer son savoir-faire tacite d'une façon empirique par le biais d'essais et erreurs (Shelby, 1964). Atteindre un niveau de compétence pourrait, par conséquent, nécessiter plusieurs années d'exercice.

Le savoir-faire, d'après Arbousse-Bastide (2006), peut-être de plusieurs types :

- Les savoir-faire à transmission générale ne sont pas enseignés, mais intégrés au cours de la jeunesse dans le mode de vie ; *« ce sont les connaissances qui semblent aller de soi »* (p.2) pour leurs détenteurs vus qu'elles sont *« assimilées par presque la totalité d'une communauté »* (p.2).
- Savoir-faire à transmission restreinte *« sont liés à des activités artisanales spécialisées »* (p.3), à des métiers. Ils sont faciles à identifier et à communiquer à autrui.
- Les secrets de fabrication sont *« des connaissances personnelles acquises par la pratique et l'expérience »* (p.3) et complètent des savoir-faire à transmission générale ou restreinte, ils appartiennent souvent à la sphère privée.

Certains savoir-faire ont une valeur patrimoniale. La Convention de 2003 pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel se préoccupe par exemple des savoir-faire que suppose la réalisation d'objets artisanaux (UNESCO, 2012). L'objectif de cette convention est de s'assurer de la transmission des savoirs et des savoir-faire liés à l'artisanat traditionnel aux générations futures, afin qu'ils demeurent pratiqués au sein de leur communauté, tant comme source de revenus et une expression de créativité et d'identité culturelle (idem).

En architecture, les techniques de construction traditionnelles comportent des savoir-faire à transmission restreinte. Certains de ces savoir-faire sont hérités depuis plusieurs générations et ils ont servi à la construction de bâtiments considérés, aujourd'hui, des monuments. Ils sont encore employés dans les travaux de restitution et de conservation du patrimoine bâti (Lavigne, 2015).

1.2 Savoir-faire artisanal en architecture : aperçu historique et définitions

Depuis l'antiquité, chez les Pharaons, les Grecs et les Romains, l'édification des monuments est confiée à des maîtres-artisans ayant une connaissance des règles géométriques et des techniques de construction (Kostof, 1977). La transmission de ces savoir-faire s'effectuait dans un cadre familial par la pratique. La capacité d'un artisan à maîtriser les principes géométriques et plusieurs « arts de construction » pouvait lui valoir le mérite de s'approprier le titre de chef ouvrier ou d'« *Architecte*³ » (Tidafi, 1996). Ce mode de transmission par le travail et l'observation, dans les chantiers, demeurait la norme jusqu'à la Renaissance (Bourassa *et al.*, 1999; Davis, 2008).

Depuis cette époque, l'édification n'est plus sous le monopole des artisans de la construction. La recherche du raffinement et de l'innovation artistique ont mené à confier la définition de la forme aux artisans-artistes : des orfèvres, des peintres et des sculpteurs à l'instar de Brunelleschi, Michel Ange, Palladio, Alberti, Vasari, etc. (Tidafi, 1996). Ces artisans-artistes

³ Le préfixe « archi » signifiait où faisait référence uniquement au talent exceptionnel d'un artisan, il renvoie aux notions de rassembleur, d'organisateur ou de responsable du travail des artisans. Leurs fonctions consistaient à superviser et à diriger les travaux sur le chantier de construction. (Tidafi, 1996, p. 170)

en manque de connaissances des procédés constructifs collaboraient avec des maîtres maçons pour s'occuper des aspects techniques (idem). À partir de cette époque, le rôle des artisans se limite à exécuter les dessins des architectes. Toutefois, selon Powell (2011), plusieurs des grands bâtisseurs de l'histoire détenaient et exerçaient un savoir-faire relatif à l'architecture à l'image de la peinture, la sculpture, la taille de pierre, la maçonnerie, le travail de briques, l'ébénisterie, la ferronnerie, etc.

D'après ce court survol, nous définissons le savoir-faire artisanal en architecture comme les éléments de savoir-faire nécessaires aux artisans pour caractériser des objets (forme, matériaux, structure, etc.) et maîtriser les procédés de leur réalisation. C'est un savoir-faire à transmission restreinte qui implique une maîtrise des techniques et outils pour confectionner un objet et la connaissance de ses caractéristiques : les matériaux, les dimensions, les proportions, les formes, les couleurs, les textures, la géométrie, etc. Par exemple, un tailleur de pierres doit connaître les spécificités de l'objet à fabriquer, des outils et procédés à employer pour le produire. Un briqueteur maîtrise les caractéristiques du mur qu'il va construire, le type des briques, les techniques d'empilage, la nature du liant à utiliser, etc.

En résumé, l'aspect matériel ou la matérialité est une condition du savoir-faire artisanal en architecture. D'un autre côté, nous signalons que les processus de formalisation et de création d'artéfacts artisanaux demeurent généralement tacites, à transmission restreinte et qui peuvent différer d'un artisan à un autre.

La Figure 1 positionne le savoir-faire artisanal en architecture par rapport au savoir-faire en général. C'est un savoir-faire en architecture à transmission restreinte pour la production d'artéfacts selon des procédés et échelles limités et non industriels.

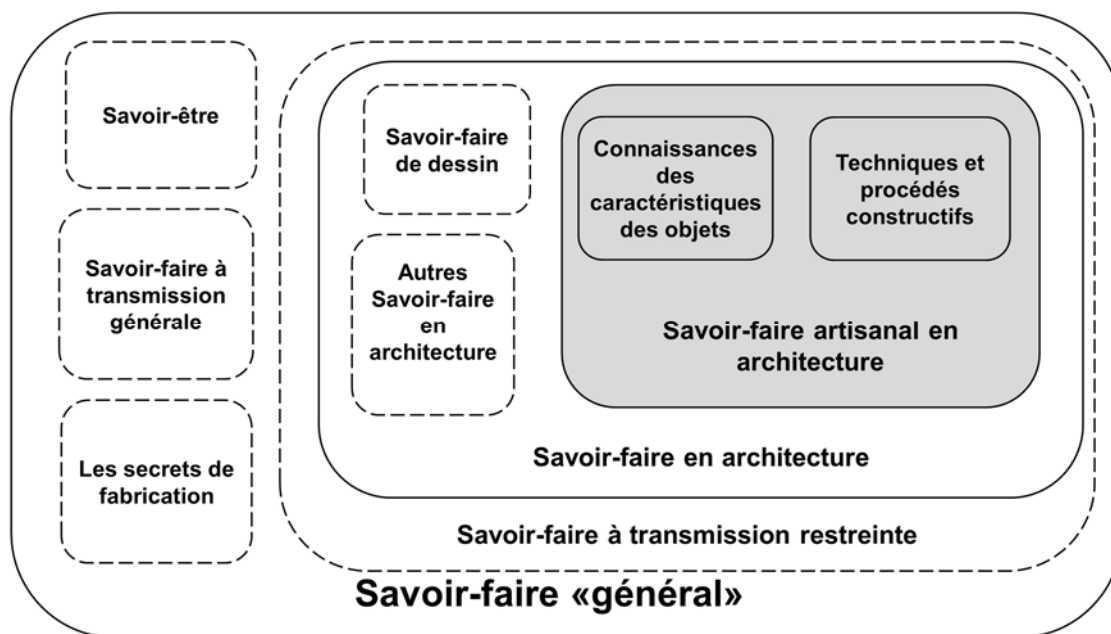


Figure 1 : Le savoir-faire artisanal en architecture par rapport à la notion du savoir-faire (© Mnejja 2016)

1.3 Savoir-faire artisanal en architecture, entre déclin et nécessité

L'intérêt à préserver le savoir-faire remonte à l'époque succédant la Révolution française, une ère marquée par des réflexions relatives au patrimoine. Un consensus existait par rapport à « *l'importance de recourir aux artisans, aux métiers d'arts et aux artistes et la nécessité de créer un corpus de connaissance afin de bien conserver et restaurer et de garantir la transmission des savoirs et savoir-faire issus de leurs anciens* » (David, 2012, pp. 247-248). Ainsi, il est important de « sauver » les savoir-faire artisanaux indispensables pour la préservation du patrimoine bâti.

Le 20^e siècle est marqué par des transformations sociales, économiques, culturelles, démographiques et le développement de nouvelles technologies. Le mouvement Bauhaus illustre les impacts de ces changements dans la formation des concepteurs (Siebenbrodt et Schöbe, 2012) ; les architectes devaient alors répondre à des besoins et contraintes inédites et travailler avec des matériaux composites et des procédés constructifs industrialisés (préfabrication, utilisation du béton armé, etc.) (Idem). Dans ce contexte, des styles architecturaux avec une expression minimaliste et épurée se sont développés (Blistène, 1999). Par conséquent, des métiers sont apparus tel que ceux d'électricien, plombier, etc. Ces derniers

sont une conséquence de l'essor des récentes technologies. En revanche, d'autres professions se sont éclipsées, engendrant la quasi-disparition dans plusieurs cas d'un savoir-faire artisanal existant depuis plusieurs générations à l'exemple des sculpteurs et graveurs des pierres (ARTisanat.ch, 2011).

Le changement des modalités de transfert des savoir-faire

Pendant des décennies, les savoir-faire artisanaux en architecture se communiquaient d'un maître à un apprenti, de père en fils, dans le cadre de corporations ou des compagnonnages, par l'observation, l'écoute et l'expérimentation (Charbonneau, 2009; David, 2012). Cette transmission n'est pas anonyme : *« Elle est soit familiale, soit élective et chacun y prend part de manière collective ou individuelle »* (Arbousse-Bastide, 2006, p. 1). Cet apprentissage « traditionnel » s'est vu substituer par des institutions et des écoles à l'exemple des *« centres d'apprentissage professionnel »* (CAP) en France (Suteau, 2013) : ce nouveau cadre s'appuie sur l'enseignement des connaissances théoriques perçues en guise d'une *« volonté de l'État d'imposer sa définition de la formation professionnelle et comme une tentative des grandes entreprises de favoriser l'industrie contre l'atelier »* (Suteau, 2013, p. 43).

Les transformations dans l'industrie de la construction

La métamorphose progressive de ce secteur pendant le 20^e siècle s'est accélérée après la Seconde Guerre mondiale pour répondre aux besoins en bâtiments engendrés par la croissance économique et le besoin de la réédification des villes (Fares, 2012). Les chantiers sont devenus un lieu d'assemblage d'éléments préfabriqués (Richard, 2006) dont la durée s'est raccourcie en des mois, des jours et dans certains cas en uniquement quelques heures (Bock et Linner, 2015a). Ce contexte exige de nouvelles compétences et écarte des métiers « artisanaux » considérés économiquement non rentables. Ainsi, plusieurs artisans se sont limités à quelques opérations de sauvegarde et de restauration (Nogent-le-Rotrou, 2014) ; ce sont des mutations qui ont engendré le déclin d'un savoir-faire artisanal et la perte d'un héritage culturel (Chevallier, 2016; Poulot, 2015). De ces faits, les artisans qui subsistent se sentent désabusés et impuissants face aux nouvelles méthodes de production industrialisées. Laurent Boucher, un artisan-ébéniste français, s'exprime dans la presse dans les termes suivants : *« Les métiers de l'artisanat sont sinistrés aujourd'hui. Le savoir-faire qui faisait notre renommée a disparu. La profession a*

beaucoup changé et n'est plus reconnue à sa juste valeur ». Il se sent impuissant et démotivé à éduquer des apprentis et leur transmettre son savoir-faire : *« Mais maintenant, ce n'est plus possible. Il n'y a plus de débouchés. Pourquoi former un jeune si c'est pour ne pas avoir de travail. Après ? Je ne veux pas qu'il se lance dans une voie sans issue »* (Nogent-le-Rotrou, 2014).

La situation au Québec

Au Québec, selon Luc Delavigne, président du Conseil des métiers d'art du Québec (CMAQ) : *« Il y a quelques métiers d'art traditionnel qui sont en voie de disparition, mais heureusement beaucoup d'entre eux ont su évoluer avec le temps et notamment avec l'utilisation du numérique. Certains métiers comme les tisserands, les luthiers, les céramistes ou les ébénistes ont su s'adapter aux nouvelles technologies et aux nouvelles attentes du public »* (Le Maléfan, 2014). La situation pour les métiers reliés à l'architecture et au bâtiment est toutefois particulière :

« Depuis deux ans, le CMAQ a entrepris d'importantes démarches pour rejoindre les artisans des métiers d'art liés à l'architecture et au bâtiment afin de reconnaître leur travail professionnel. Il s'agit de métiers à risque, car ils sont souvent mêlés aux ouvriers du bâtiment. Un tailleur de pierre se retrouvait considéré comme un maçon » (idem).

Des métiers en voie de disparition

Le portail des artisans d'Art de Suisse romande illustre le risque de disparition des métiers et des savoir-faire artisanaux qui touchent particulièrement ceux de l'architecture et la restauration du patrimoine. On y publie une liste de ces professions menacées (Tableau I.)

Construction	Travail de la pierre	Travail du bois	Travail du métal
<ul style="list-style-type: none"> • Ardoisier ou lauzier • Briquetier • Chaumier • Parqueteur • Tuilier • Tavillonneur • Fumiste ou poêlier (fabrication de fourneaux à catelles et cheminées intérieures) • Maçons capables de réaliser un crépi « à la chaux » ou un mur en moellons • Gypsier 	<ul style="list-style-type: none"> • Fontainier • Graveur sur pierre • Marbrier • Marqueteur de pierres dures • Sculpteur sur pierre • Tailleur de pierre • Carriériste • Tourneur sur pierre • Polisseur sur pierre 	<ul style="list-style-type: none"> • Doreur sur bois (réfection de cadres de tableaux) • Encadreur • Marqueteur • Pipier • Rotinier • Vannier • Sabotier • Tonnelier • Fabricant de cannes, canneur, empailleur 	<ul style="list-style-type: none"> • Bronzier • Coutelier • Ciseleur • Damasquineur • Doreur • Argenteur • Émailleur • Graveur • Dinandier • Ferronnier d'art • Fondeur de cloches et sonnailles • Potier d'étain • Sculpteur sur métal • Forgeron • Enlumineur • Serrurier d'art

Tableau I : Métiers et savoir-faire artisanaux liés à l'architecture et la restauration en voie de disparition (ARTisanat.ch, 2011)

Savoir-faire artisanal en architecture : perspectives économiques

Le patrimoine bâti suscitait l'attention des politiciens et des architectes depuis le 19^e siècle avec les travaux de restauration d'Eugène Viollet-le-Duc et l'instauration du titre d'« architecte en chef des monuments historiques » en France. L'époque contemporaine a vu le développement de programmes d'enseignement spécialisés en patrimoine dans plusieurs universités (Derieux, 2004) et l'établissement de plusieurs politiques, lois et conventions d'ordre local ou international dans le domaine (Tanniou, 2012; I. UNESCO, 1994). En effet, les savoir-faire artisanaux demeurent nécessaires pour conserver des monuments historiques à vocation touristique (Cheviron, 2012; Gunay et Dokmeci, 2012; Prigent, 2013; Vernieres *et al.*, 2012). Au Québec, d'après Lavigne (2015), ceci présente un marché important de 90 M\$ et pourrait offrir plus que 1000 emplois bien payés à temps plein dans un secteur menacé par le manque de relève.

1.4 Conclusion

Le savoir-faire est une notion complexe, elle comprend des dimensions culturelles, techniques, historiques, personnelles, communautaires ; elle est souvent associée à un métier de production matérielle, etc.

Le savoir-faire artisanal en architecture, l'objet de notre recherche, exige une connaissance profonde des caractéristiques de l'artéfact à confectionner et de l'ensemble des techniques et outils utilisés dans ce processus. Il est conditionné par la réalisation matérielle et il a été employé dans l'édification de monuments qui ont aujourd'hui une certaine valeur patrimoniale.

Le savoir-faire artisanal a un intérêt culturel. Sa transmission implique une relation entre un maître et un apprenant. Cela nécessite l'observation, le jugement, les connaissances des instruments, et la pratique pendant de longues périodes. Certaines nouvelles technologies, les transformations dans l'industrie de la construction et des modalités d'enseignement ont contribué au déclin des savoir-faire artisanaux, la régression et la raréfaction de plusieurs métiers en architecture. Par conséquent, une main-d'œuvre très spécialisée est disparue ou presque.

Or, les savoir-faire artisanaux en architecture sont nécessaires pour la conservation et l'entretien du patrimoine bâti ; ils génèrent du travail et constituent un patrimoine immatériel et un héritage culturel. Nous avons constaté que, d'après le CMAQ, l'adaptation aux nouvelles technologies numériques pourrait être une solution pour soutenir la préservation des savoir-faire artisanaux (Le Maléfan, 2014) particulièrement en architecture.

Le chapitre suivant porte sur les moyens numériques et leurs rôles dans un tel contexte, à la fois de rareté des savoir-faire artisanaux en architecture et d'intérêt pour les préserver.

2 Moyens numériques et transformation en architecture : vers une quête de la matérialité

À travers le précédent chapitre, nous avons constaté que la matérialité et la capacité de fabriquer des artefacts sont des conditions de tout savoir-faire artisanal en architecture et que les moyens numériques peuvent être des solutions utiles dans un contexte de rareté de ces savoir-faire. Nous exposons, dans ce chapitre, un état de l'art des approches et des outils numériques qui pourraient contribuer à la sauvegarde des savoir-faire artisanaux dans un tel contexte, particulièrement pour la caractérisation des artefacts et leur fabrication.

Dans la pratique professionnelle, le rôle de l'informatique est passé d'instruments de dessins, de modélisation et de documentation à des outils utilisés pour la simulation, la génération des formes, la gestion d'information (Wujec, 2011) et la production (Bock et Linner, 2015a; F. Gramazio, 2014b). Ces nouveaux outils permettent de fabriquer d'une manière directe par différentes technologies (impressions 3D, machines à contrôle numérique, bras robotisés, etc.). Ils ont contribué à placer les matériaux au centre des processus de la conception ou ce qu'appelle R. Oxman (2012) « *Material-based design* ». Ces transformations font retourner la pratique architecturale à ses origines artisanales (Mnejja et Tidaï, 2015) ; c'est une forme de changement de paradigme vers une recherche de la matérialité (R. Oxman et Oxman, 2014) en impliquant une redéfinition des modèles tectoniques en architecture (R. Oxman, 2014).

Dans la suite, nous présentons un état de l'art relatif à plusieurs approches de modélisation en architecture, les outils de fabrication numériques et les modèles de la tectonique informés pour la conception à base de matériaux.

2.1 La modélisation

En architecture, dans un contexte informatique, d'après Parisel et Tidaï (1998), la modélisation consiste à représenter un phénomène ou un objet par un ordinateur pour décrire une réalité ; un modèle peut illustrer les caractéristiques géométriques, physiques, qualitatives d'un environnement, des processus de genèse, des relations logiques et métriques ou des méthodes conceptuelles. Par conséquent, les modèles varient en fonction de leur utilisation, ils

sont employés pour produire des images de synthèse, gérer des projets de construction (estimer, planifier, coordonner) ou simuler des phénomènes (physiques, structurelles, climatiques, etc.).

Dans le cadre de notre mémoire, nous considérons que l'objectif de la modélisation est la réalisation des modèles d'artéfacts en vue de les fabriquer par des procédés et outils numériques automatisés à l'instar des machines à contrôle numériques, des imprimantes 3D, des dispositifs robotisés, etc. Cela veut dire qu'un modèle devra comprendre l'ensemble d'informations nécessaires et pertinentes à sa confection comme les dimensions, types de matériaux, forme, couleur, positionnement des objets les uns par rapport aux autres, etc.

En architecture, il existe plusieurs approches de modélisation. Certaines sont déployées dans un processus de conception créatif, alors que, d'autres cherchent à modéliser des copies identiques d'artéfacts ou de monuments. Dans ce mémoire, nous nous limiterons à présenter la modélisation paramétrique et la modélisation à partir de relevés. Ces deux formes de modélisation sont utilisées dans les pratiques contemporaines pour la conception ou dans l'étude du patrimoine architectural.

2.1.1 Modélisation paramétrique

La modélisation paramétrique est un pilier du design numérique. Elle consiste à définir les relations entre les composantes d'un modèle qui sont à leur tour constituées d'entités plus élémentaires régies par d'autres règles et ainsi de suite (Woodbury, 2010). Elle utilise la logique associative de dépendance entre les objets et l'interrelation de leurs composantes (idem). Les paramètres facilitent l'édition et la génération d'instances très variées à partir d'un modèle initial (Burry, 2013). Par exemple, afin de créer un nouveau pilastre à base d'un modèle existant il suffirait de modifier les valeurs relatives aux dimensions ou à la forme.

La logique associative et la possibilité de décrire le type de relation entre les objets et même entre leurs composants ont contribué à l'émergence de nouvelles démarches conceptuelles. Branko Kolarevic (2014) stipule qu'il est devenu possible d'utiliser les performances physiques et plusieurs types d'information comme les procédés constructifs et les règles algorithmiques, en les associant à certains paramètres, dans la conception et la génération de formes architecturales (Kolarevic, 2014). Ce type de modélisation facilite le contrôle des géométries complexes ; Foster l'a employée dans plusieurs projets comme « London City Hall »

pour ajuster les formes aux éléments constructifs (Whitehead, 2014). L'utilisation des règles algorithmiques permettrait de produire de multiples propositions conceptuelles d'une manière parallèle, ce qui facilite leur comparaison et leur évaluation par rapport aux contraintes déterminées et aux objectifs d'un projet (R. Oxman et Oxman, 2014). De même, il est possible de concevoir à base de matériaux et assurer une continuité des flux d'information entre la conception et la production.

2.1.2 La modélisation par le relevé

Cette approche cherche à produire des modèles numériques à partir de relevés dont la qualité dépend des outils utilisés. De nos jours, plusieurs technologies sont capables d'effectuer des relevés très précis à l'instar de la photogrammétrie et la lasergrammétrie qui sont les plus employées en architecture.

Photogrammétrie

L'acquisition par photogrammétrie consiste à relever les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de points de vue différents (HEIG-VD, 2016). Les techniques les plus employées en architecture sont l'ortho-image et la multi-image. La première se définit comme une vue orthogonale de l'objet selon une direction, elle utilise plusieurs morceaux d'images où chacune correspond à une projection différente (Yastikli, 2007).



Figure 2 : « Europe montant le taureau » : modèle numérique à partir de l'ortho-photo et les images « raster ». (BEGRICHE, 2003).

La multi-image consiste, d'abord, à prendre plusieurs images convergentes vers l'objet en prévoyant une surface de recouvrement importante. Ensuite, déterminer des points à trois dimensions correspondants dans trois photos au minimum (Fuchs, 2006). Cette technique est appropriée pour les relevés à grande échelle comme les monuments.

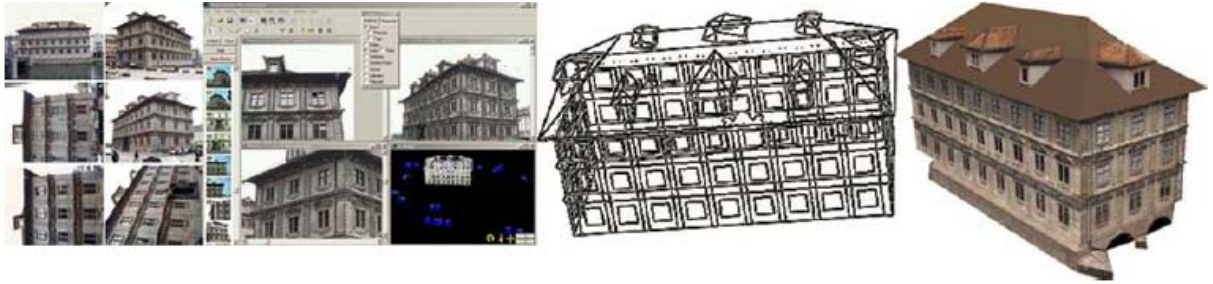


Figure 3 : Exemple de photogrammétrie architecturale multi-image, l'hôtel de ville de Zürich. (Fuchs, 2006).

Lasergrammétrie (relevé laser)

« Le principe de mesure des distances à l'aide d'un laser consiste à envoyer vers un objet une impulsion lumineuse très courte ; une partie est diffusée par l'objet et revient donc vers l'émetteur où elle est recueillie » (Fuchs, 2006). Cette technique est efficace pour les modèles complexes ; elle permet d'obtenir des nuages de points qui seront traités et segmentés pour réaliser des maillages.

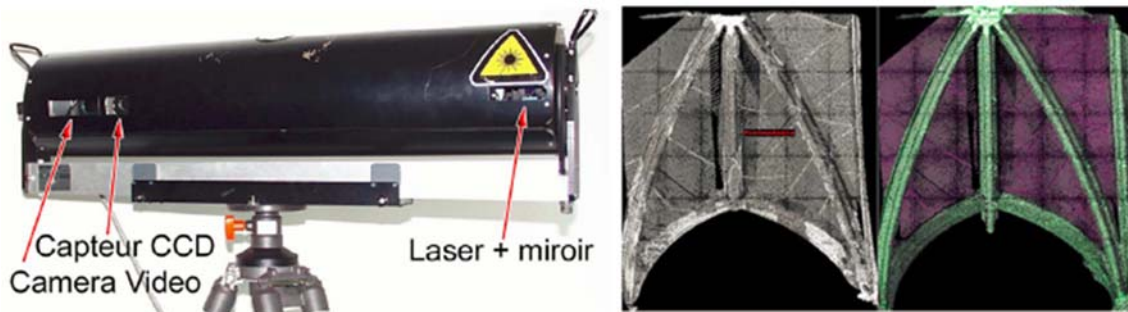


Figure 4 : (à gauche) le capteur « SOISIC » de MENSIS ; (à droite) Segmentation (salle capitulaire, Figeac), MAP — CRAI Nancy (Fuchs, 2006).

Ces deux techniques précédemment illustrées permettent de réaliser des relevés très précis et sont adaptées pour la documentation des artefacts.

La photogrammétrie est efficace dans le cas des édifices ou des monuments tandis que le lasergrammétrie est relevé plus appropriée pour relever de petits objets détaillés et complexes (bas-reliefs, gravures, etc.). Finalement, le processus de modélisation comprend trois étapes : l'acquisition des informations, leur traitement et la modélisation (Mnejja, 2010) (Figure 5).



Figure 5 : Méthodologie générale de relevés numériques et modélisation 3D (Fuchs, 2006).

2.2 Outils numériques de fabrication

Les progrès technologiques contemporains permettent d’exploiter les modèles numériques par la continuité des flux d’information entre la conception et la production. En architecture, les principaux outils de fabrication numériques utilisés sont les machines à contrôle numériques, les imprimantes 3D et les bras robotisés.

2.2.1 Les machines à contrôle numérique (CNC)

Les machines à contrôle numérique (CNC), « *Computer Numerical Control* », sont commandées par ordinateur, assurant une continuité de flux d’informations dans le processus (conception/fabrication). Elles permettent l’usinage très précis d’objets par les techniques de fraisage ou de tournage. Elles possèdent dans la plupart des cas trois axes de mouvement et sont adaptées à la production en grande quantité (Bock et Linner, 2015b). En architecture, Fabian Scheurer les a employées dans la construction de projets complexes en bois (Figure 6).



Figure 6 : En haut usinage d'éléments par des machines CNC : en bas à gauche, le projet de « Nine Bridges Golf club », à droite le « Kilden performing arts center ». (DESIGN-TO-PRODUCTION, 2010)

2.2.2 Les imprimantes 3D

L'impression tridimensionnelle est un procédé de fabrication additive. Ces dispositifs utilisent (1) le modelage par dépôt de matière en fusion (FDM : *Fusion deposition modeling*) ; (2) la stéréolithographie (STL) où une lumière UV solidifie une couche de plastique liquide ou (3) le frittage sélectif où un laser agglomère une strate de poudre. Ces outils peuvent imprimer avec d'autres matériaux de différentes textures, couleurs, degrés de transparences, rigidités, souplesse, etc.

Les imprimantes 3D « conventionnelles » sont limitées par les dimensions de leurs trois axes de mouvement. Cependant, les bras robotisés permettent de surpasser ces contraintes grâce à leur rayon d'action plus important (Gardiner et Janssen, 2014). Nous illustrons ci-dessous deux exemples de ces dispositifs pour les techniques FDM et STL.

La déposition du matériau en fusion (FDM) : dans ce cas, une buse accrochée au robot réchauffe un fil en résine (Figure 7). Toutefois, un modèle numérique est nécessaire pour calculer les trajets que doit parcourir le bras robotisé.

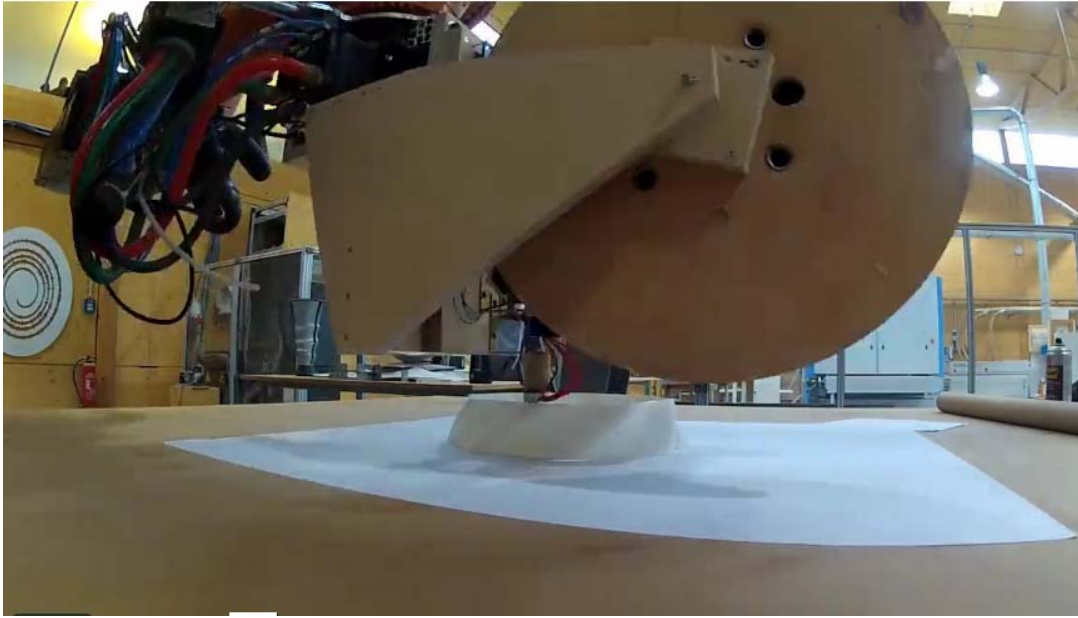


Figure 7 : Exemple d'outil développé par « artisengineering » qui comprend un support pour le fil en résine (Artisengineering, 2015)

Stéréolithographie (STL) : Le principe consiste à fixer un bac contenant une résine liquide à un bras robotisé. Une lumière UV solidifie progressivement des couches en plastique liquides pour créer le modèle (Figure 8). Comme dans le cas de la FDM, les robots permettent l'impression selon des dimensions plus importantes.

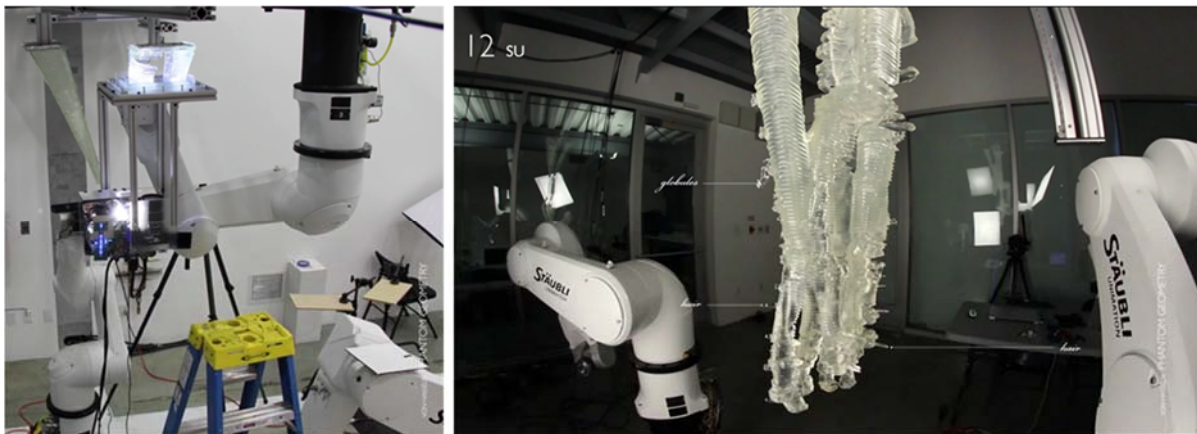


Figure 8 : (à gauche) exemple de dispositif pour impression STL (à droite) le modèle titulaire du « SCI-Arc Gehry Prize » (capture d'écran) (SCI-Arc, 2012)

2.2.3 Les bras robotisés

L'utilisation de robots en construction n'est pas récente, les Japonais étaient les premiers à les intégrer dans une logique analogue à celle de l'industrie automobile (Bock et Linner, 2015b). La diminution des coûts d'achats des robots a permis leur emploi dans des cadres plus restreints (Menges, 2012). Ils sont plus polyvalents que les machines d'usinage à contrôle numériques (CNC) pour une exploitation « *artisanale* » ; ils peuvent employer plusieurs outils pour couper, plier, tisser, scier, sculpter, imprimer, souder etc. (F. Gramazio, 2014b). Néanmoins, jusqu'à nos jours, le principal usage en architecture se limite à un cadre expérimental et académique.

Le premier laboratoire de recherche en robotique et architecture a vu le jour à l'école polytechnique fédérale de Zürich (ETH Zurich) en 2005 (Gramazio et Kohler, 2016). Depuis, d'autres ont été fondés, en particulier à l'institut de design computationnel (*Institute for computational design – ICD*) à la Faculté d'architecture et de planification urbaine de l'Université de Stuttgart (Allemagne) dirigé par Achim Menges. En décembre 2010, l'association pour les robots en architecture, « *Association for robots in architecture* » (Robots-in-Architecture, 2015), a été établie par Sigrid Brell-Cokcan et Johannes Braumann afin de partager les expériences et les connaissances entre les différents groupes dans le monde ; elle a organisé sa première biennale en 2012 à Vienne (Brell-Cokcan et Braumann, 2013), puis en 2014 à l'Université du Michigan (McGee *et al.*, 2014) et à Sydney en 2016.

Un bras est caractérisé par son rayon d'action, sa capacité de charge et le nombre de ses axes (généralement 6). Les principaux équipementiers sont l'allemand KUKA, les Suisses ABB et Stäubli, le danois UR (Universal Robots) et le japonais FANUC. Toutefois, chaque dispositif robotisé nécessite des instruments et logiciels personnalisés pour accomplir des tâches spécifiques.

Équipement matériel

Les outils sont la partie la plus importante dans un dispositif robotisé, ils exécutent tous des actions « standard » de fraisages, de percements, de peinture ou de déplacement d'objets. En architecture, il est souvent indispensable de les particulariser en fonction des projets et parfois utiliser des accessoires à l'instar des axes supplémentaires (des rails, des supports

mobiles), des distributeurs de matériaux (briques, fibres, résines, etc.), des tables tournantes ou des instruments standards (perceuses, scies, etc.) (F. Gramazio, 2014b)

Équipement logiciel

Un bras robotisé est neutre, il exécute des instructions dictées par un code de contrôle en langage machine. En architecture, plusieurs plug-ins ont été développés pour générer automatiquement ce code à partir des modèles numériques. Ces plug-ins permettent de simuler et visualiser le processus de fabrication et assurent la continuité de flux d'informations entre les modèles conçus et les objets produits.

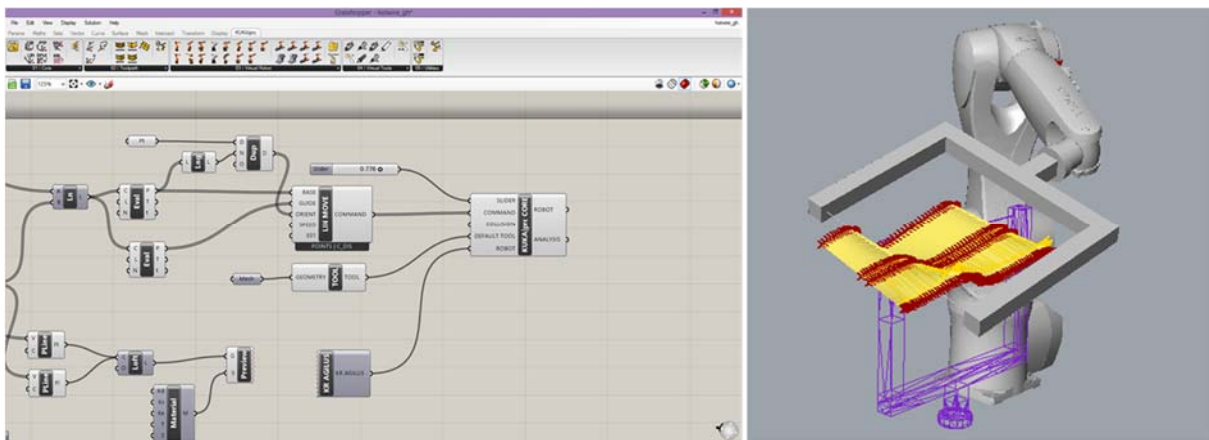


Figure 9 : Interface de Kuka PRC (© Mnejja, 2016)

Les progrès numériques relatifs aux approches de modélisation et les technologies de relevés et de fabrication ont offerts des possibilités aux concepteurs qui peuvent, désormais, exploiter des approches conceptuelles, explorer plusieurs alternatives et intégrer les matériaux et les procédés de fabrication dans le processus de conception. Ainsi, de nos jours, il est opportun de travailler à partir des matériaux à la même manière que les artisans d'antan. Ces progrès ont conduit à l'essor des approches de conception s'appuyant sur les matériaux et par conséquent la redéfinition des modèles tectoniques en architecture.

2.3 Les approches de matérialisation par le numérique en architecture ; les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux

“Material-based design is defined as computational informing process that enhances the integration between structure, material, and form within the logic of fabrication technologies... We are currently witnessing a transition within the digital design process. The growing affinity between the interest in the role of materials in design and in the relationship to tectonics has produced a “new materiality” (R. Oxman, 2014, p. 225).

Les nouveaux moyens numériques étudiés dans la section précédente favorisent la continuité des flux d'information entre la conception et la production d'objet et l'utilisation des matériaux comme base pour concevoir. Rivka Oxman (2014) considère ces progrès comme un que changement de paradigme en architecture. C'est un déplacement vers de nouvelles relations tectoniques. En effet, la tectonique en architecture est la relation symbolique entre forme, structure et matériaux (R. Oxman et Oxman, 2014, p. 219). La tectonique numérique a transformé l'ontologie de la tectonique moderne qui avançait une séparation entre formes et enveloppe, vers une fusion entre surface et matériaux selon des processus de structuration et des modèles de comportement de forme, structure et matériau. De ce fait, l'architecture est de retour à ses sources matérielles par le biais des transformations facilitées par les technologies de fabrication, l'informatique et l'automatisation de la production (CAD/CAM). Ces avancées ont permis aux designers d'être impliqués à la fois dans la conception et la construction (Kolarevic et Klinger, 2013).

Oxman (2014) avance le terme « *Material-based design* » que nous traduisons par « *conception à base de matériaux* » : ce sont des processus dans lesquels les techniques numériques intègrent des informations sur les matériaux et les procédures de fabrication (*digital informing technique*) ce qu'améliore l'association entre forme, structure et matériau (R. Oxman, 2014). Elle introduit le terme « *informed tectonics* » ou la tectonique informée comme un

concept central de cette approche de conception qui propose une synthèse des processus de conception et production. La collaboration entre les acteurs d'un projet (architecte, ingénieur et constructeur) n'est plus séquentielle, ces derniers devront travailler d'une manière synchrone et intégrée dès les premières étapes d'un projet (Kokorus *et al.*, 2016). Elle permet ainsi d'incorporer les procédures de matérialisation et les technologies de fabrication d'une manière anticipée.

La tectonique informée pour la conception à base de matériaux s'appuie sur un flux continu d'informations entre la conception et la confection d'un artéfact. Elle « reproduit » des processus similaires à ceux de savoir-faire artisanal en architecture qui comprennent la définition des caractéristiques d'un objet et sa fabrication selon une pratique intimement liée à la matière.

Ces modèles font référence à différentes approches pour la matérialisation en architecture par le numérique. Nous présenterons certains d'entre eux en détail au cours du chapitre 4 consacré à étudier les contributions des pratiques contemporaines en milieux contrôlés aux savoir-faire artisanaux en architecture. À partir d'un ensemble de cas, R. Oxman (2014) a établi une classification des modèles de la tectonique informée à travers des études en s'appuyant sur les points suivants :

- Les types de processus holistique de la conception à base des matériaux (*types of holistic models of material-based design*) : il s'agit d'identifier, d'une part, les processus conceptuels intégrés, c'est-à-dire les combinaisons de la forme, structures, matières et les procédés de fabrication. Ensuite, de reconnaître les divers processus de matérialisation.
- Le flux d'information (*information flow*) : déceler les types de connaissances et techniques qui soutiennent le flux d'informations dans les modèles de la conception à base de matériaux.
- La réorganisation des relations tectoniques (*Re-ordering of tectonics relationships*) : il s'agit d'identifier et réorganiser l'ordre des priorités dans les relations entre forme, structure et matière dans le processus de la conception à base de matériaux.
- L'intégration des procédés de la fabrication dans les processus tectoniques : consiste à identifier comment les processus de fabrication sont intégrés et liés dans les processus

interactifs de la génération des formes et au processus de négociation entre forme et structure.

R. Oxman (2014) proposait 7 modèles de la tectonique informée pour la conception basée sur les matériaux :

- Le modèle de rationalisation (*The rationalization model*)
- Le modèle évolutif ou génératif (*The evolutionary model*)
- Le modèle des flux de la conception à la production (*The flow model - from design to production*).
- Le Modèle de structuration des matériaux (*Material structuring and the timber fabric model*).
- Modèle de la fabrication robotisée personnalisée (*Robotic fabrication as a large scale customization model*)
- Modèle de la matérialité du numérique (*The digital materiality model*).
- Modèle des propriétés variables des matériaux (*digital material and the variable property model*)

2.4 Conclusion

L'utilisation des moyens numériques en architecture s'appuie sur la modélisation. En effet, un modèle numérique d'un objet intègre plusieurs informations relatives à ses caractéristiques qui permettent de le fabriquer par des bras robotisés, des imprimantes 3D ou des machines à contrôle numérique. De même, il pourrait présenter une réplique d'un objet réalisé par relevé ou être un support de conception qui sera modifiée et adaptée dans un processus créatif.

La modélisation paramétrique est une approche qui intègre des informations de différentes natures comme des règles algorithmiques, des performances et particulièrement les caractéristiques des matériaux et les procédés de fabrication. Cette caractéristique utilisée avec des outils de fabrication numériques rend les flux d'informations continus entre la conception et la production. En plus de ces transformations, la collaboration entre les différents acteurs (architectes, ingénieurs, etc.) commence dès la définition des concepts dans un projet.

Les moyens numériques actuels ont permis, selon R. Oxman (2014), de redéfinir les relations tectoniques en architecture. Ainsi, la dissociation entre formes, structure et matériaux, proposée par le courant moderniste, cède sa place à une fusion entre ces trois composantes. Oxman pense que les matériaux pourront être une base pour la conception « *Material Based design* », une approche à laquelle elle associe 7 modèles de la tectonique informés.

Nous considérons que les moyens numériques contemporains pourraient s'arrimer à certains aspects des savoir-faire artisanaux en architecture. La modélisation contribue à consigner les caractéristiques des objets tandis que la continuité des flux d'information et les outils de fabrications numériques pourraient faciliter leurs réalisations.

3 Question de recherche, objectifs et approche méthodologique

Dans ce chapitre, nous rappelons notre question générale de recherche et nous énoncerons les objectifs de ce mémoire avant de présenter notre approche méthodologique qui s'appuie sur l'analyse de cas multiples.

3.1 Question et objectifs

Pour rappel, notre question est la suivante :

« Quelles contributions les moyens numériques peuvent-ils apporter dans un contexte de rareté, voire de perte de savoir-faire artisanaux en architecture ? »

Un moyen « sert d'intermédiaire et permet de faire quelque chose » (Robert *et al.*, 1993, p. 681), c'est un médiateur, un synonyme de capacités ou d'aptitudes physiques ou intellectuelles ; c'est un procédé ou une méthode d'aboutissement d'une finalité (Robert *et al.*, 1988, p. 1240) ; c'est « ce qui sert à arriver à une fin » (Tidafi (1996, p. 5). L'emploi du terme moyen « numérique » se rapporte à l'informatique, il comprend les outils et approches de modélisation et de fabrication présentés dans le chapitre précédent. Nous explorons les manières par lesquelles ces moyens peuvent pallier la perte des savoir-faire artisanaux, leurs apports et leurs limites.

Pour mener cette recherche exploratoire, nous nous appuyons sur les résultats de travaux relatifs à l'utilisation des moyens numérique dans les processus de fabrication à une échelle non industrielle (artisanale) en architecture. De même, nous faisons référence aux approches les plus récentes pour la matérialisation en architecture et particulièrement les modèles de la tectonique informée pour la conception à base des matériaux (R. Oxman, 2014).

Nous cherchons donc à comprendre en quoi les moyens numériques pourraient répondre aux problèmes engendrés par la rareté, voire la perte de certains savoir-faire artisanaux en architecture, notamment en ce qui concerne la caractérisation d'objets et leur fabrication.

Les objectifs de notre recherche sont les suivants :

- Identifier les différentes utilisations de moyens numériques pour la construction en architecture, dont la place qu'ils occupent à l'extérieur d'un cadre contrôlé, et leurs liens avec des savoir-faire artisanaux
- Caractériser ces moyens, ainsi que les 2 cas proposés, selon les modèles de la tectonique numérique proposés par Oxman.
- Voir ce qui se dégage du modèle lorsqu'il est mis en lien avec le concept d'artisanat (est-ce qu'on peut penser qu'il s'agit d'un nouvel artisanat ?)
- Proposer des pistes de réflexion quant à la contribution des moyens numériques.

Nous illustrons lors de la section suivante, la stratégie et les méthodes qui nous serviront à atteindre nos objectifs.

3.2 Approche méthodologique

L'utilisation des moyens numériques en architecture en vue de fabriquer des artefacts d'une manière automatisée est très récente et se limite encore à un cadre expérimental. Dans ce travail, nous faisons face à un phénomène nouveau et émergent dont nous ne disposons pas d'un nombre suffisant d'exemples en vue d'établir une réalité statistique. Ainsi, nous pensons que l'analyse de cas multiples, dans une perspective qualitative, pourrait être plus adaptée à notre recherche, ce que nous permettra d'aborder ce phénomène à partir de plusieurs exemples.

Nous considérons que cette méthode qualitative semble être convenable à notre recherche, car elle nous permettra d'examiner un phénomène particulier (Stoecker, 1991), de nous limiter à un nombre restreint de cas pertinents et qui présentent un intérêt par rapport à notre questionnement. En effet, notre recherche se distingue des études statistiques par échantillonnage par l'observation et la profondeur d'analyse. Ceci nous a permis d'explorer un système cerné d'une manière détaillée à travers plusieurs sources d'informations.

3.2.1 Opérationnalisation de la recherche

Afin d'atteindre les objectifs énoncés, nous avons organisé notre recherche en deux volets complémentaires.

Premier volet de recherche : analyse de cas multiples dans un milieu expérimental

Dans le premier volet de notre recherche, en prenant appui sur des modèles de la tectonique informée pour la conception à base des matériaux, nous recensons différents exemples d'utilisation de moyens numériques pour la construction en architecture. Cette manière de procéder nous permet ainsi d'identifier une variété d'outils (voire de pratiques), puis d'examiner leurs liens avec des savoir-faire artisanaux.

Pour chaque exemple examiné, nous procédons, d'abord, à décrire le déroulement de l'expérience et à la mettre dans son contexte. Ensuite, nous décrivons comment les moyens numériques permettent-ils la caractérisation d'objets et leur fabrication. Enfin, nous mettons en évidence les contributions possibles de ces outils numériques et du modèle de la tectonique informée dans lequel ils s'inscrivent aux savoir-faire artisanaux en architecture.

Dans ce premier volet de notre recherche, nous analysons les cas d'une manière systématique, car il est important de transférer les données selon une structure unique : *« il s'agit de construire une base de données qualitative qui renfermera les résultats de toutes les sources »* (Yin, 1989, p. 31).

Second volet de recherche : analyse de cas dans le cadre de projet de construction ou de restauration

Dans le second volet de la recherche, nous nous intéressons à deux exemples d'utilisation des moyens numériques dans des projets de construction ou de restauration comportant la fabrication d'éléments censés être exécutés selon des procédés artisanaux. Cette partie nous permettra de mettre en évidence les contributions des moyens numériques dans ces situations pratiques, de constater leurs limites et observer les obstacles probables à leur emploi quotidien.

Nous nous penchons sur les exemples de la Sagrada Família à Barcelone et du parlement canadien à Ottawa. Ces derniers nous permettront d'examiner l'utilisation du numérique selon deux perspectives différentes. Le premier est un projet de construction tandis que le deuxième concerne une opération de restauration. Dans les deux cas, nous prenons appui sur des publications scientifiques reconnues par les pairs et d'autres documents reliés à ces deux projets.

Dans cette deuxième phase de la recherche, nous présentons, d'abord, le contexte de chaque cas. Ensuite, nous examinerons comment les moyens numériques ont été reliés à certains

savoir-faire artisanaux en architecture, particulièrement en ce qui a trait à la caractérisation des objets et leur fabrication. Finalement, nous positionnons chaque exemple étudié par rapport aux modèles de la tectonique informée pour la conception à base des matériaux afin de mettre en évidence les contributions de ces modèles aux savoir-faire artisanaux en architecture.

3.2.2 Standards de qualité, apports et limites de l'approche méthodologique

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé des données secondaires. Nous n'avons pas réalisé des observations directes, mais nous nous sommes appuyés sur des résultats issus d'autres chercheurs. Pour nous assurer de leur crédibilité, nous nous sommes restreints aux exemples publiés dans plusieurs revues et journaux cités par d'autres chercheurs. Ce sont les efforts que nous avons menés pour garantir la validité interne qui se rapporte à la convenance d'observations empiriques et leurs interprétations (Creswell, 2007).

Dans un souci de généralisation des résultats, nous nous sommes intéressés à plusieurs approches de modélisation informatique, outils de fabrication numérique et modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux.

L'analyse d'exemple de cas nous permettra d'explorer de nouveaux phénomènes. Toutefois, elle n'est pas exempte de certaines faiblesses et limites (Creswell, 2007). Elle se base sur des informations partielles qui ne représentent pas toute la réalité. Aussi la validité externe d'une recherche pourrait être affectée lorsque les cas sélectionnés ne permettent pas une généralisation statistique (idem). Ceci étant dit, compte tenu de nos objectifs de recherche, la méthode sélectionnée s'avère appropriée, nous permettant d'examiner plusieurs situations concrètes sur la base d'une diversité de données, provenant de différentes sources, afin de mieux comprendre les contributions de plusieurs outils numériques dans un contexte de rareté de savoir-faire artisanal en architecture.

3.3 Conclusion

Notre stratégie repose sur deux ensembles d'analyses de cas multiples. Dans le premier volet, nous observerons des expérimentations réalisées dans un contexte expérimental. Nous cherchons à énumérer les contributions possibles des moyens numériques aux aspects relatives à la caractérisation des objets et à leur fabrication. En fonction des exemples présentés, nous

essayons de recenser, en architecture, les métiers et savoir-faire artisanaux qui pourront bénéficier des apports de ces moyens.

Le second volet est consacré à l'analyse de deux cas réalisés dans un contexte de projet de construction et de restauration. Nous cherchons, en plus d'énumérer les contributions des moyens numériques, à examiner leur apport à la pratique artisanale et les obstacles à l'utilisation de cette technologie.

L'analyse de cas multiples nous permettra, à partir d'un nombre restreint d'exemples, d'étudier un nouveau phénomène et examiner les apports des moyens numériques pour compenser la perte de certains savoir-faire artisanaux en architecture, leurs limites et apports.

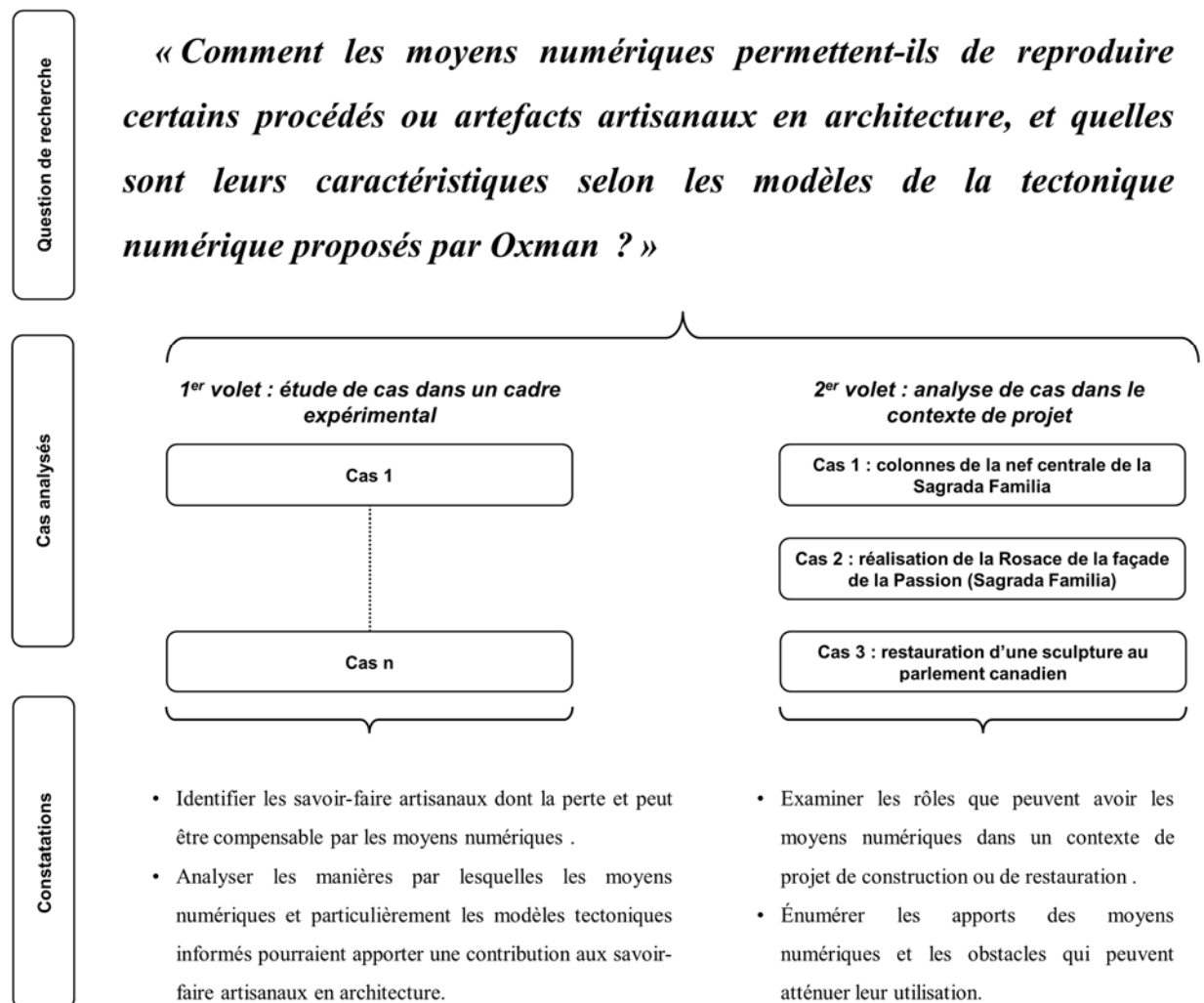


Figure 10 : Stratégie générale de recherche (© Mnejja 2016).

Deuxième Partie : analyses de cas

4 Analyses des approches numériques de matérialisation dans un milieu contrôlé

À travers ce chapitre, nous analysons un ensemble de cas afin de repérer les contributions possibles des moyens numériques pour la caractérisation des objets et leur fabrication. Ceci nous permettra d'énumérer certains savoir-faire artisanaux en architecture auxquels ces moyens pourraient apporter une certaine contribution. Les exemples sont répartis en fonction de leurs degrés de correspondance à un modèle particulier de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux.

4.1 La tectonique informée pour conception à base de matériaux en architecture

En ce premier volet, nous faisons référence aux modèles de la tectonique informée pour la conception à base des matériaux. Ces modèles comprennent des processus qui intègrent deux conditions des savoir-faire artisanaux : l'utilisation des matériaux et la maîtrise des procédures de fabrication.

4.1.1 Le modèle de rationalisation

En considérant la conception comme un processus de résolution de problèmes (*problem solving*) (Cross, 2008), la construction de formes complexes nécessite des solutions constructives réalisables et abordables. Pottmann (2010), affirme que l'intégration d'informations relatives à la géométrie et les processus de production, fabrication et construction permettaient de générer des solutions appropriées. Parmi les outils, la modélisation paramétrique pourrait incorporer les informations ci-dessus citées et des algorithmes d'optimisation (Pottmann *et al.*, 2015).

En résumé, ce modèle regroupe des techniques ou des procédures dans lesquelles les outils numériques sont employés pour traduire fidèlement les intentions des concepteurs d'une manière la plus économe en matériaux afin d'optimiser les ressources pour la fabrication des formes complexes (R. Oxman, 2014).

La Figure 11 illustre comment l'utilisation d'outils numériques relatifs au modèle de rationalisation a permis de générer une solution constructive qui respecte le mieux les intentions des concepteurs. Dans cet exemple, la modélisation paramétrique et des algorithmes génétiques intègrent plusieurs techniques de fabrication et proposent une solution optimale.

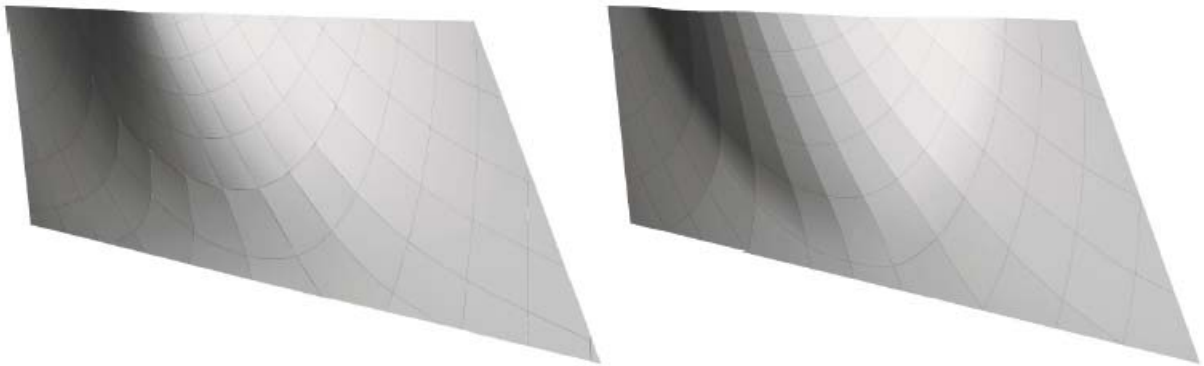


Figure 11 : à gauche la géométrie des pavillons de la tour Eiffel conçus par des panneaux cylindriques. À droite la même approximation réalisée par des bandes pliées avec un plus grand angle de tolérance (Pottmann et al., 2015, p. 19).

En architecture, les artisans rationalisent et optimisent les matériaux pour confectionner des géométries courbées comme des arcs, des voûtes ou des coupoles. Dans la suite, nous examinons un exemple où des moyens numériques ont été utilisés pour proposer des solutions optimales.

Rob Arch

Description

Cette expérience menée par Trummer *et al.* (2013) de l'université technique de Graz, « *TU Graz* », en Autriche, étudie une interprétation de la taille de pierre dans la construction afin de proposer une solution qui respecte au mieux les intentions des concepteurs tout en optimisant les ressources utilisées.

Contributions des moyens numériques

Caractérisation des objets :

Dans cet exemple, la modélisation paramétrique a été utilisée, car elle permet d'intégrer des algorithmes génétiques d'optimisation, les efforts physiques, les propriétés des matériaux, etc. Ainsi, il a été possible de simuler les forces subies par l'arche et générer ses composantes sous formes identiques et optimales qui seront assemblées par imbrication (Figure 12).

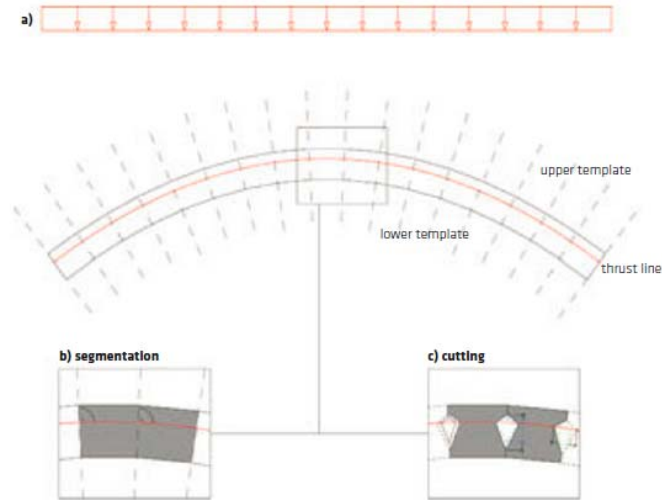


Figure 12 : Modélisation, segmentation et découpage (Trummer et al., 2013, p. 115)

Dans la pratique artisanale, la forme d'une arche, par exemple, est tracée au sol afin d'agencer les éléments qu'ils le composent l'un près de l'autre et les tailler en conséquence.



Figure 13 : Traçage et montage des pierres composant une arche.(Beth, 2007, p. 49)

Procédés de fabrication :

Les composants de l'arche sont fabriqués par un bras robotisé équipé d'une fraiseuse (Mill) (Figure 14). Les informations nécessaires sont issues du modèle paramétrique et traduit sous forme d'un code qui contrôle le dispositif.



Figure 14 : Usinage et assemblage (virtuel) de l'arche (Trummer et al., 2013, p. 113 & 117)

La principale contribution des moyens numériques, dans ce cas un dispositif robotisé, est la capacité d'usiner des pièces identiques d'une manière précise et rapide.



Figure 15 : (à gauche) exemple d'outils artisanaux de taille des pierres (à droite) un artisan en train de tailler une pierre (Beth, 2007, p. 48 & 49)

Outils numériques utilisés

La modélisation paramétrique pour la conception de l'arche et ses composantes et un bras robotisé équipé d'une fraiseuse ont été employés dans la fabrication.

Métier ou Savoir-faire artisanaux relatifs à l'exemple présenté

Les outils numériques utilisés dans l'exemple illustré ci-dessus pourraient être déployés dans des métiers qui ont recours à des savoir-faire artisanaux relatifs à certaines techniques de taille et de gravure de pierre. Le modèle de rationalisation et les outils numériques présentés pourraient être transposés pour la construction de coupoles ou de voûtes. Les moyens numériques offrent rapidité et précision d'exécution (Figure 16).



Figure 16 : Montage artisanal d'un arc (Beth, 2007, p. 59)

4.1.2 Le modèle des flux de la conception à la production

Ce modèle regroupe des techniques et outils qui assurent une continuité d'informations entre la conception et la fabrication d'un objet. Il est plus général que le modèle de la rationalisation qui est approprié aux formes complexes.

Dans ce modèle, les outils utilisés incorporent et communiquent les informations pendant le processus conception-fabrication. D'après Scheurer (2010), il est nécessaire d'intégrer les informations pertinentes, particulièrement celles relatives aux procédés constructifs dès la définition des concepts. En effet, un concept initial permet de réaliser un modèle qui sera adapté d'une manière continue jusqu'à la fabrication finale d'un objet grâce à la modélisation paramétrique.

La machine à contrôle numérique (CNC) est la plus utilisée dans des processus associés à ce modèle de la tectonique informée. Toutefois, tous les outils de fabrication numériques comme les dispositifs robotisés et les imprimantes 3D peuvent être utilisés.

Nous pouvons assimiler la démarche dans ce modèle au principe du travail d'un artisan. Son savoir-faire artisanal lui permet de produire des objets d'une manière directe.

Pavillons expérimentaux de l'ETH Zurich

Plusieurs métiers et savoir-faire artisanaux en architecture et construction font usage du bois. Les charpentiers l'utilisent pour réaliser des structures, les menuisiers y confectionnent des portes et fenêtres tandis que les sculpteurs le transforment en œuvres décoratives. Nous illustrons ceci par les exemples de « *The sequential structure* » et le « *stacked pavilion* » à l'ETH Zurich.

Description

Dans ces deux exemples, des moyens numériques ont été utilisés dans des constructions en bois. Le « *stacked pavilion* » a été construit à Wettswill am Albis en Suisse (2009) ; c'est un pavillon temporaire conçu pour accueillir des événements publics à Zürich. Il est composé de 16 colonnes, chacune comprend 372 lattes assemblées par des bras robotisés.

Le « *sequential structure* » est une installation à l'ETH Zurich ; c'est le développement de projets étudiants qui expérimentent les façons de concevoir des structures en bois. La modélisation paramétrique a été utilisée pour développer des concepts et réaliser des simulations et les détails de fabrication.



Figure 17: À gauche, “The stacked pavilion”; à droite, “the sequential structure” (F. Gramazio, 2014b)

Contribution des moyens numériques

Caractérisation des objets :

La forme et la structure des modèles ont été définies par des maquettes numériques qui servent à étudier les jonctions, caractériser et usiner toutes les composantes. L'intégration d'information relative aux matériaux et aux procédés constructifs (taille des lattes, types d'assemblages, etc.) permet de développer un modèle détaillé de chaque latte utilisé dans la construction.



Figure 18 : Des petites maquettes d'esquisses de « séquentielle structure » (F. Gramazio, 2014b)

Procédés de fabrication :

Les modèles paramétriques ont permis de détailler chaque élément de la structure à réaliser. Ainsi, en utilisant des dispositifs robotisés composés de bras et d'outils employés en menuiserie, chaque constituant a été usiné individuellement avant d'être assemblé.

Outils numériques utilisés

La modélisation paramétrique a été employée pour concevoir et détailler les structures en bois à travers les logiciels (*Rhino*, *Grasshopper*). Le code de contrôle des dispositifs robotisés a été généré à partir des modèles par les logiciels *RobotStudio* et « *RAPID code* » (Figure 19). Pour la fabrication, il y a eu recours à des bras robotisés de la marque « Universal Robot » et « ABB », des outils et accessoires (perceuses, scies, etc.) (Figure 20).



Figure 19 : À gauche, interface de logiciel Rhino déployé pour étudier les modèles numériques ; à droite, le bras robotisé UR5 (F. Gramazio, 2014b)

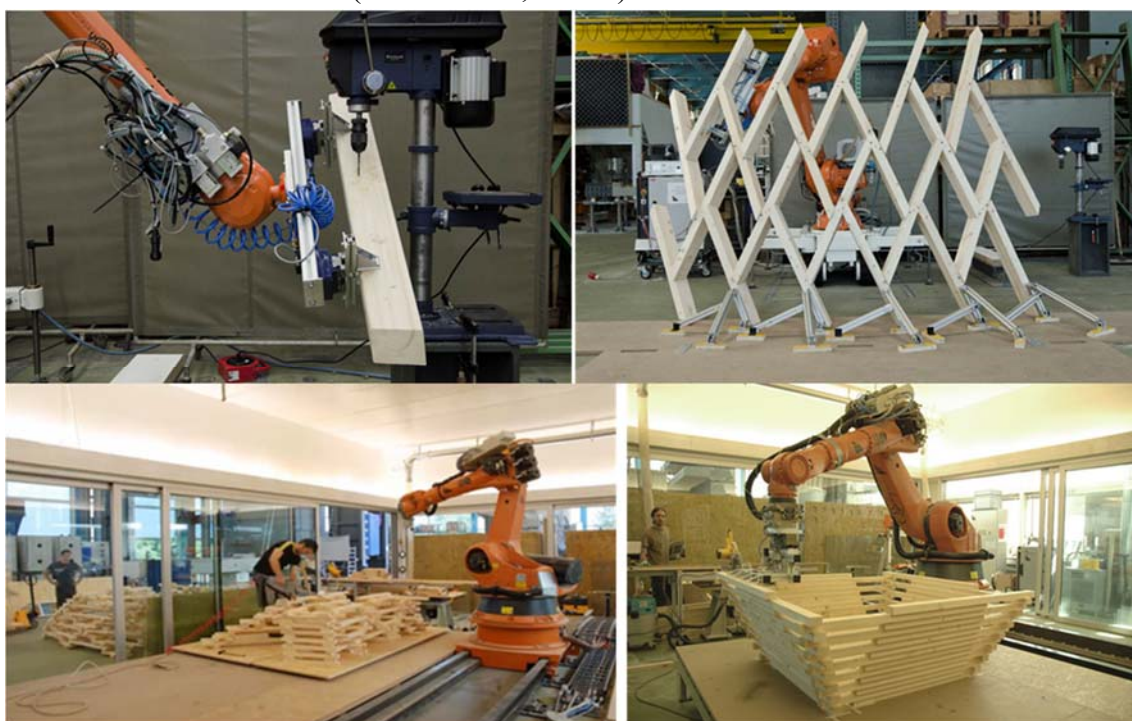


Figure 20 : Les différents outils de fabrication (bras robotisés et accessoires) (F. Gramazio, 2014b).

Métier ou Savoir-faire artisanaux relatifs à l'exemple présenté

Nous pensons, en nous appuyant sur les cas examinés ci-dessous, que les moyens numériques employés selon le modèle de flux de l'information de la conception à la fabrication sont en mesure de reproduire plusieurs aspects relatifs au métier de charpentier, particulièrement le savoir-faire artisanal de façonnage des composantes d'une structure en bois.

4.1.3 Modèle de la fabrication robotisée personnalisée

Ce modèle étend les possibilités des méthodes de construction conventionnelles afin de réaliser des tâches complexes à grande échelle (Bechthold, 2010). Il se base sur les capacités des robots d'opérer toute forme de mouvement (Menges, 2012). Les approches que comprend ce modèle s'appuient sur la continuité des flux d'information entre la conception et la fabrication, mais il se distingue par l'intégration des informations relatives aux procédures de construction artisanale dès la phase de la conception et la reproduction de techniques artisanales comme construire des murs en briques à motif personnalisé, réaliser une mosaïque par des dispositifs robotisés.

Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland, 2006

Description

Ce projet est l'extension d'un vignoble à Fläsch en Suisse, conçu par les architectes Bearth et de Plazas. C'est un espace pour la fermentation dont la façade s'inspire d'une caisse de raisin. Celle-ci est composée de près de 20 000 briques qui ont été placées d'une manière précise par des bras robotisés (F. Gramazio, 2014a; F. Gramazio et Kohler, 2008).



Figure 21 : À gauche, Élévation ; à droite, vue intérieure (F. Gramazio, 2014a).

Contribution des moyens numériques

Caractérisation des objets :

Les motifs de la façade ont été définis à partir du concept des raisins dans une caisse. La modélisation paramétrique, au biais du plug-in Grasshopper pour Rhino, a permis de réaliser un modèle détaillé des façades en intégrant les concepts imaginés par les architectes, les spécificités des briques utilisées et les techniques de construction. Ainsi il a été possible de déterminer le nombre exact des briques et l'emplacement précis de chacune.

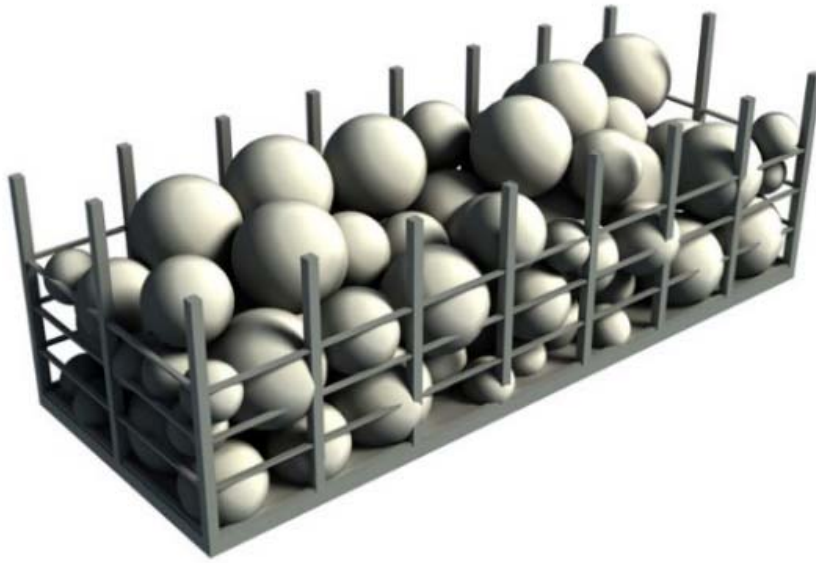


Figure 22 : Source d'inspiration (la caisse des raisins) (F. Gramazio, 2014a)

Procédés de fabrication :

Le modèle numérique a servi pour générer les actions du robot : prendre une brique, appliquer le liant, et la placer à son emplacement précis.

Outils numériques utilisés

La modélisation paramétrique a été employée pour la réalisation du modèle numérique par les plug-ins Grasshopper pour Rhino. Concernant la fabrication, un dispositif composé d'un bras robotisé, un rail, des distributeurs de briques et du liant et un gripper ont été déployés en plus des logiciels utilisés pour la génération du code du contrôle.



Figure 23 : Dispositifs robotisés utilisés ; à gauche bras robotisé à 6 axes installés sur rail ; à droite, Gripper et applicateur de liant (F. Gramazio, 2014a).

Métier ou Savoir-faire artisanal dont la perte est compensable

Nous pensons que l'exemple présenté ci-dessus pourrait être employé pour la réalisation de motifs de recouvrement de façade d'une manière précise et rapide. L'artisan positionne les briques selon des règles et un système de proportions qu'il a appris ; il reproduit un motif caractéristique d'une région ou une culture.



Figure 24 : (à gauche) couvrement losangé du mur en brique (Patrimoine-histoire, 2008) ; (à droite) motif en briques à Touzeur (Tunisie) (Service-protestant-de-mission, 2014).

Robotic tile placement/placement robotisé des tuiles

Description

Cette expérimentation menée à l'école de design de l'université Harvard en 2012, financée par « *ASCER Tile of Spain* » pour développer le processus de création d'un modèle complexe dont la réalisation manuelle est très onéreuse (King *et al.*, 2014). Cette étude s'appuie sur la continuité des flux d'information et les capacités d'optimisations qu'offrent les moyens numériques, cependant elle se distingue par l'utilisation d'un dispositif robotisé pour positionner les mosaïques. Dans cet exemple, le portrait de Maryline Monroe a été reproduit avec des mosaïques en céramique (idem).

Contribution des moyens numériques

Caractérisation des objets :

La modélisation paramétrique intègre le portrait de Monroe afin de le convertir en forme de mosaïques au biais d'un algorithme qui incorpore les tailles réelles des tuiles utilisées.

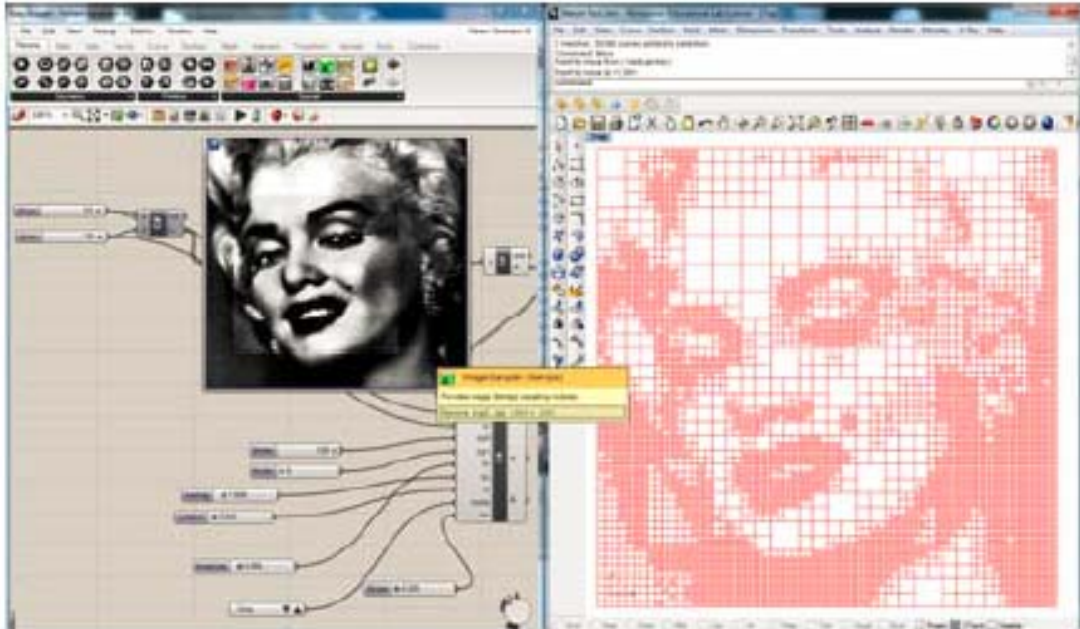


Figure 25 : Conversion des niveaux de gris en un schéma (pattern) ; l'image est recréée à travers la densité des lignes (King et al., 2014).

Procédés de fabrication :

Le modèle paramétrique a servi pour générer automatiquement le code du contrôle du bras robotisé.

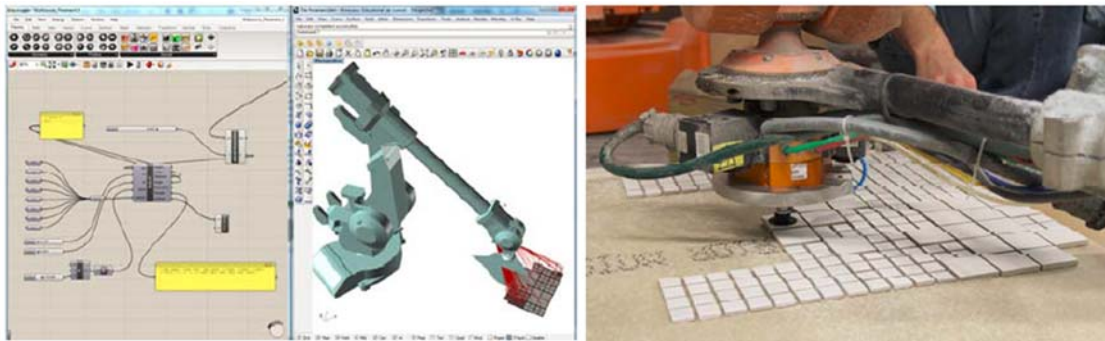


Figure 26 : (à gauche) simulation de processus de réalisation ; (à droite) placement des carreaux de céramiques par le bras robotisé (King et al., 2014).

Outils numériques utilisés

La modélisation paramétrique a été employée pour créer le modèle en mosaïque grâce au logiciel *Grasshopper* de *Rhino*. Ensuite, un dispositif robotisé composé d'un bras de marque ABB équipée d'un gripper et contrôlés par les logiciels *RobotStudio* et « *RAPID code* » a été déployé dans la fabrication.

Métier ou Savoir-faire artisanal relatifs à l'exemple présenté-

Nous pensons que les moyens numériques utilisés dans le cas illustré ci-dessus sont en mesure de reproduire certains aspects des savoir-faire artisanaux relatifs au travail de céramique. Dans les pratiques traditionnelles, les artisans réalisent des dessins ou des schémas sur un support pour placer les mosaïques. Dans notre cas, des tuiles standardisées monochromes ont été utilisées, le développement de dispositifs de découpage sera intéressant et possible avec les technologies existantes. Cette technologie pourrait être adaptée pour reproduire le savoir-faire artisanal pour la pose de carreaux de revêtement en céramique, marbre ou pierre.

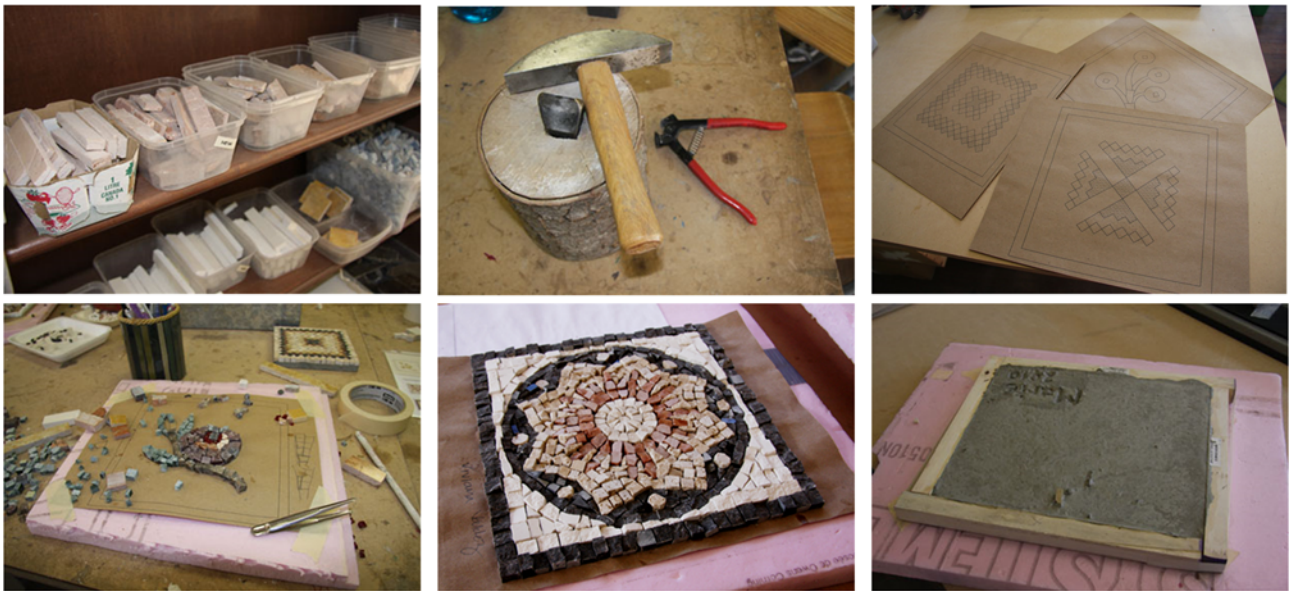


Figure 27 : Étapes et outils nécessaires pour la réalisation d'une mosaïque romaine (Crépeau, 2010).

Fabrication des moules

Description

C'est une expérience menée par Clifford *et al.* (2014) (MIT) pour étudier la création des moules à usage unique en polystyrène expansé (EPS) selon un procédé robotisé soustractif qui emploie un couteau à rayons variable.

Contribution des moyens numériques

Caractérisation des objets :

L'approche de la modélisation paramétrique a été utilisée pour la modélisation des moules. Elle a permis d'intégrer la forme de couteau dans le processus de la conception.

Procédés de fabrication :

Un bras robotisé équipé d'un couteau circulaire réalise une sculpture « en négatif », dans laquelle sera coulé un plâtre fibreux.

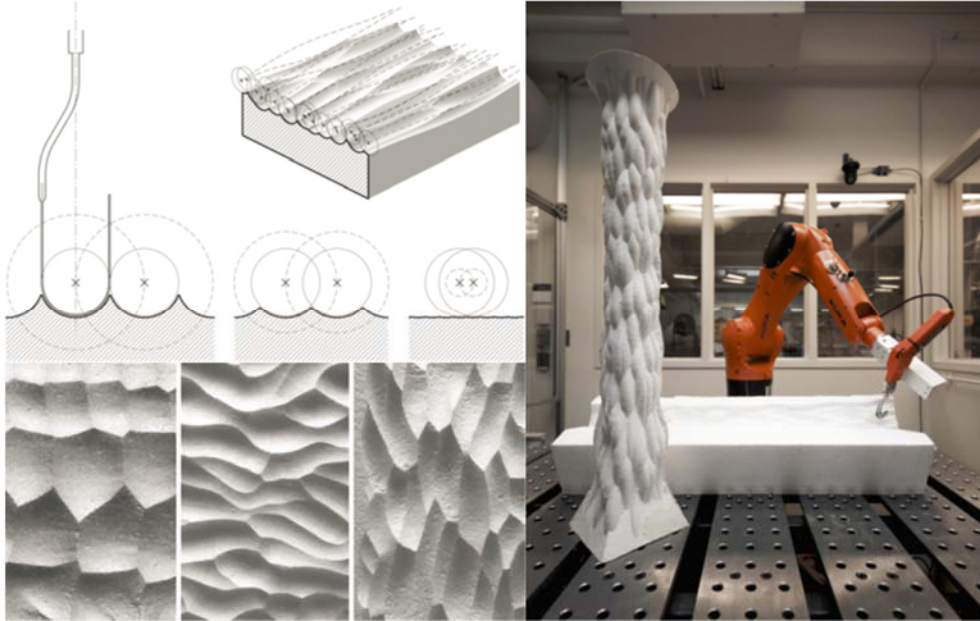


Figure 28 : Techniques de sculpture et moulage d'une colonne (Clifford et al., 2014)

Outils numériques utilisés

La modélisation paramétrique a été employée à travers le logiciel Grasshopper. Ensuite, la fabrication a été effectuée par un dispositif robotisé composé d'un bras de marque KUKA équipé d'un instrument de gravure (couteau chaud) et contrôlé par le logiciel KUKA prc.

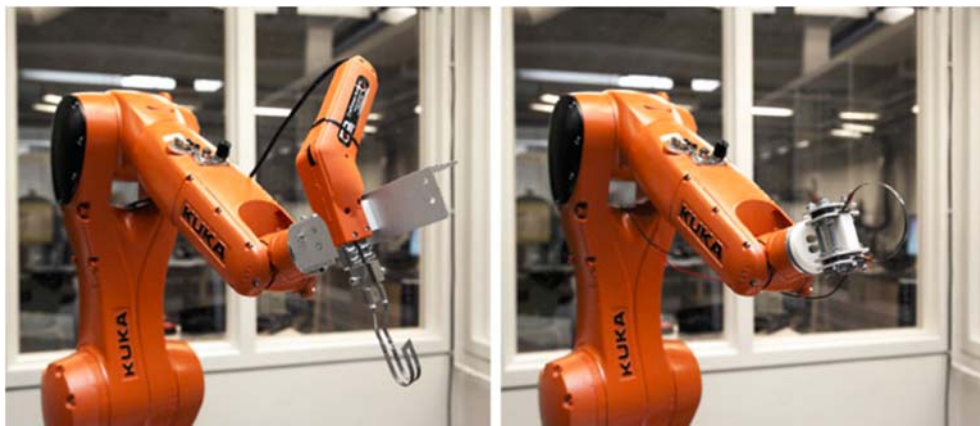


Figure 29 : Dispositifs robotisés équipés de couteaux chauds « hot-knife » (Clifford et al., 2014)

Métier ou Savoir-faire artisanal relatifs à l'exemple présenté

La réalisation des moules est un savoir-faire artisanal très ancien ; il permet de dupliquer des objets identiques à travers le coulage du plâtre. Cette technique est utilisée pour fabriquer économiquement des bas-reliefs ou des statues. Dans la pratique, un artisan sculpte le modèle qu'il voudrait copier en argile pour créer la moule en un matériau liquide antiadhésif à prise rapide, ceci permettra la création de plusieurs copies. La Figure 31 illustre la procédure artisanale pour la fabrication d'une moulure en plâtre.

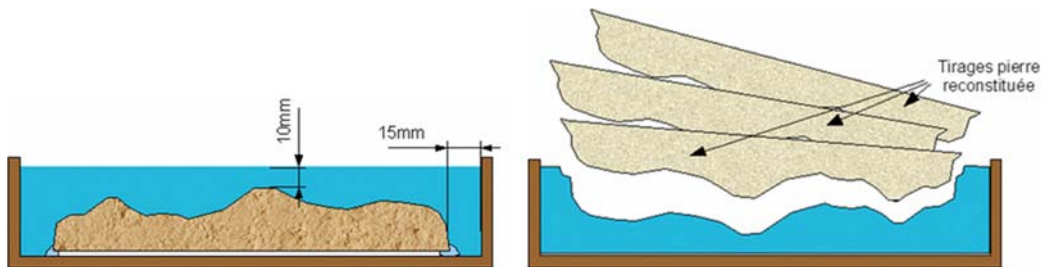


Figure 30 : Création de moules et reproduction d'objets par la technique de « Moule Bateau » (Rêve-de-pierre, 2006).



Coulage du fond de la mouleure avec un plâtre assez liquide et étalement de celui-ci afin que la filasse puisse se coller sur toute la surface.



Mise en place de la filasse, à sec, afin de ne pas faire de boule. Recouvrement par un plâtre plus pâteux.



Recouvrement par un plâtre plus pâteux. Vérification de la place restante pour la mouleure.



Coulage du plâtre nécessaire pour réaliser toute la mouleure. Passage du profil surélevé de quelques millimètres.



Passage du profil jusqu'à obtention de la finition voulue. Séchage et stockage des moules verticalement afin de ne pas les déformer.



Figure 31 : Processus de fabrication artisanale d'une moulure en plâtre (Beth, 2007, p. 40)

4.1.4 Modèle des propriétés variables des matériaux

Ce modèle s'appuie sur les capacités des moyens numériques d'utiliser les matériaux comme base de la conception. Ainsi, il est possible de composer de nouveaux matériaux et simuler leurs comportements dans un processus créatif. Les différents exemples réalisés s'inspirent de la nature et des matériaux biologiques (N. Oxman, 2011). Dans ce modèle on fait abstraction de la séparation entre formes, structure et matériaux et on prône une totale fusion entre ces trois concepts.

Le groupe de recherche « *Mediated Matter* » (MIT USA) a développé plusieurs outils afin d'expérimenter de nouveaux matériaux pour l'impression tridimensionnelle. C'est le cas du projet « *Freeform 3D printing : towards a sustainable approach to additive manufacturing* » (N. Oxman *et al.*, 2013), ils ont dû développer des matériaux autoporteurs à base de fibres extrudées par une buse.



Figure 32 : À gauche : la buse d'extrusion, au milieu : détail, à droite : impression libre de structure (N. Oxman *et al.*, 2013)

Dans l'exemple « *pneumatic biomaterials deposition* » (Mogas-Soldevila *et Oxman*, 2015), une structure a été réalisée en utilisant un matériau développé à base d'eau déposée par une buse pneumatique (Figure 33).



Figure 33 : En haut la buse pneumatique, en bas droite : modèle imprimé à l'échelle humaine, à gauche : niveau de précision (Duro-Royo *et al.*, 2015).

Plusieurs artisans doivent composer les matériaux qu'ils utilisent à partir d'ingrédients élémentaires. Par exemple, la ferronnerie artisanale exige des forgerons la fabrication des métaux et aciers à base de minerais, c'est un savoir-faire artisanal important dans leur métier.

MX3D Bridge : exemple d'impression des métaux.

Description

L'« impression » des métaux a atteint un niveau d'efficacité et de coût raisonnable pour un usage industrialisé. Ce procédé est capable d'usiner des éléments légers, complexes, très résistants et performants en optimisant les matériaux utilisés (Figure 35) (Warton *et al.*, 2014).



Figure 34 : Exemple d'équipement pour impression en métal (Source : Joris Laarman Lab) cité par (Browell, 2014)



Figure 35 : L'impression métallique permet d'optimiser les matériaux et réaliser des structures solides et légères (Warton *et al.* 2014, pp. 151-152).

Le cas examiné ici est un projet, initié en octobre 2015, qui consiste à construire un pont métallique conçu par Joris Laarman Lab® à Amsterdam pour expérimenter un outil développé en concertation avec plusieurs industriels.

Contribution des moyens numériques

Caractérisation des objets :

La modélisation paramétrique permet de simuler le comportement de matériaux et concevoir des formes optimales par l'utilisation d'algorithmes de création.

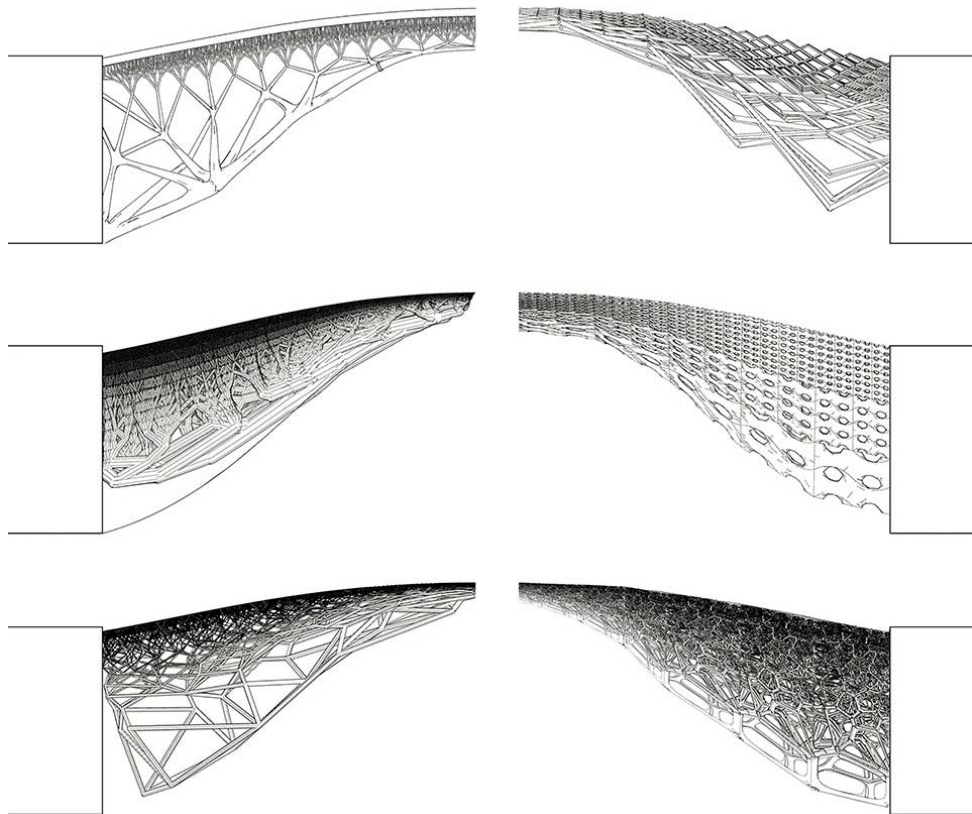


Figure 36 : Schémas et esquisse du pont (MX3D, 2014)

Procédés de fabrication :

Des dispositifs robotisés composés de bras et d'une buse pour l'impression des objets métalliques en fonction du modèle paramétrique.



Figure 37 : Simulation de la proposition ; deux bras robotisés impriment un pont métallique à Amsterdam (MX3D, 2014).

Outils numériques utilisés

La caractérisation des objets a été réalisée par la modélisation paramétrique à travers les logiciels Grasshopper de Rhino tandis que la fabrication est effectuée par un dispositif robotisé contrôlé par le plug-in HAL.

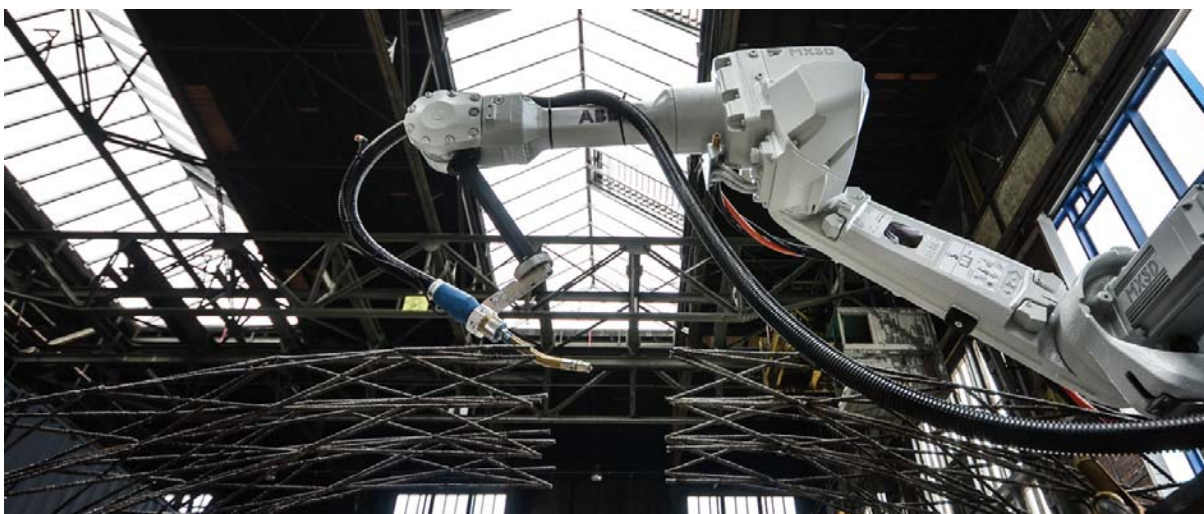


Figure 38 : Dispositif robotisé utilisé (idem)

Métier ou Savoir-faire artisanal dont la perte est compensable

Nous pensons que le dispositif présenté pourrait contribuer aux savoir-faire artisanaux du métier du forgeron. Dans la pratique, un artisan-forgeron devra fabriquer le métal qu'il va utiliser à partir de minerais (fer, carbone, chrome, etc.). Ces derniers sont fondus dans un « four bas » pour obtenir une masse de métal pâteuse qui doit être martelée à chaud pour se débarrasser des impuretés (Les-Forges-de-Montréal, 2011).



Ci-dessus, alimentation du fourneau par charges alternées en minerai et charbon de bois. L'opération de réduction de minerai est en cours. La descente du minerai dans le four se fait au rythme de la combustion.



Vidange régulière du four de ses scories



Ci-dessus, compactage de la loupe à la sortie du four.



Réchauffage de la loupe dans la forge tunnel



Après refroidissement de la loupe; analyse et vérification de présence de fer.



Récupération de la loupe".



compactage et épuration (cinglage) de la loupe



Le massiot est ensuite battu et replié plusieurs fois, afin d'obtenir un morceau de fer forgeable (corroyage)



A gauche, la moitié d'une loupe et le lingot obtenu à partir de l'autre moitié après l'avoir compactée et épurée des scories à la forge .



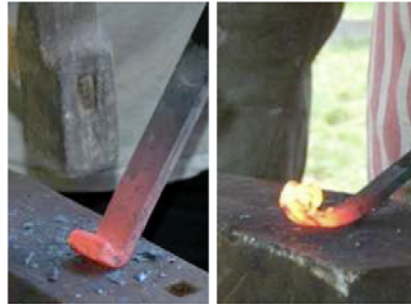
Figure 39 : Réduction en bas fourneaux adapté de (Les-Forges-de-Montréal, 2011, p. 4)

Pour pouvoir fabriquer des éléments pour la construction, l'artisan doit chauffer le métal dans une forge équipée d'une soufflerie qui l'alimente d'air sous pression afin d'activer la combustion du charbon et maintenir une température adéquate. Plusieurs outils tels que l'écluse, des marteaux, la bigorne et des tenailles sont utilisés par l'artisan qui devra maîtriser un ensemble de techniques (plier, amincir, couper, refouler, percer des trous, souder au feu, etc.).



Pliage de l'extrémité de la barre

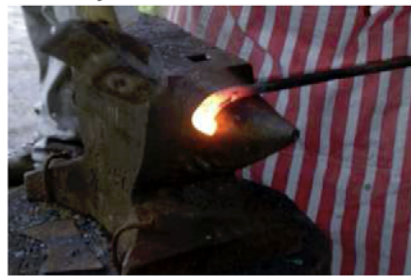
Lors de la réalisation de plusieurs pièces identiques, on fabrique un gabarit ou faux-rouleau.



Ecrasement et arrondi de la partie pliée pour créer le noyau.



Enroulement de la volute sur le faux-rouleau à l'aide de griffes.



Formage de la volute au marteau sur la bigorne.



Une grande volute est réalisée en plusieurs passes.



Redressement de la volute.



Refroidissement à l'eau pour figer la forme.

Figure 40 : Réalisation d'une volute à noyau (Les-Forges-de-Montréal, 2011, p. 32)

Bien qu'ils soient encore en cours de recherche et développement, ces dispositifs ont les capacités de reproduire le savoir-faire artisanal de plusieurs métiers relatifs aux métaux en architecture qui exigent beaucoup d'effort physique. Ils sont aptes à produire rapidement des éléments très détaillés et complexes tout en économisant énergie et matériaux.

4.2 Interprétation et conclusions

À travers ce chapitre, nous avons observé un ensemble d'exemples organisé selon les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matière en architecture. Nous avons constaté que les cas examinés présentent des approches que nous pensons en mesure de reproduire certains aspects du savoir-faire artisanaux en architecture comme la caractérisation et fabrication d'artéfacts considérés comme artisanaux, mais selon de nouveaux procédés.

4.2.1 Moyens numériques et savoir-faire artisanaux

Nous avons constaté que les exemples étudiés partagent les points suivants :

- Les matériaux sont à la base de la conception.
- La modélisation paramétrique est utilisée pour caractériser les objets.
- La continuité des flux d'information est assurée entre conception et fabrication.
- Et les outils numériques sont utilisés pour la fabrication.

La modélisation paramétrique intègre des informations de différentes natures, particulièrement, celles relatives aux propriétés des matériaux et aux possibilités qu'ils peuvent offrir. De leur part, les outils numériques de fabrication permettent la réalisation des artéfacts ou de leurs composantes d'une manière rapide et précise.

Dans les exemples que nous avons cités, il y a eu recours aux bras robotisés. Nous avons constaté que leur utilisation en architecture est encore à un niveau académique et expérimental, toutefois, leur polyvalence pourrait contribuer à préserver des savoir-faire par la production d'artéfacts. Le Tableau II illustre les moyens et la nature de procédés de fabrication ainsi que les savoir-faire artisanaux en architecture.

Exemple	Matériau	Outils de fabrication	Nature de procédé	Savoir-faire artisanaux
Rob Arch	Polystyrène Bois	Bras robotisé	Soustractif	Taille de pierre Construction d'arc, voûtes et coupoles en pierre
Pavillons ETH	Lamelles de bois	Bras robotisé	Additif & soustractif	Fabrication des composantes de structures et charpentes en bois
Gantenbein vineyard Façade	Brique cuites,	Bras robotisé	Additif	Réalisation de motifs en briques
Robotic tile placement	Mosaïques, céramiques	Bras robotisé	Additif	Réalisation de mosaïques
Fabrication de moules	Polystyrène expansé Mousse plâtre	Bras robotisé	Soustractif	Gravure et sculpture des moules Sculpture Confection des moulures artisanales en plâtre
MX3D Bridge	Acier	Bras robotisé	Additif	Ferronnerie artisanale

Tableau II : Moyens numériques, nature de processus et savoir-faire artisanaux en architecture.
(© Mnejja 2016)

Les savoir-faire artisanaux en architecture sont conditionnés par les matériaux. Les cas étudiés dans ce chapitre nous révèlent la possibilité de l'utilisation de la pierre, de la brique, du bois, de l'argile, de la céramique et du métal. Ce sont des matériaux fréquemment employés en architecture. Nous constatons aussi le recours à des procédés additifs, soustractifs ou les deux dans certains exemples.

Les moyens numériques de fabrication offrent les qualités suivantes qui pourraient être importantes dans une pratique artisanale.

La précision : La taille de pierre pour construire une voûte ou coupole, la production des motifs en briques ou de mosaïques nécessite perfectionnement et attention de la part d'un artisan. C'est une capacité qui se développe après de longues années de pratique.

Les actions répétitives : certains métiers artisanaux en architecture exigent de réitérer certains mouvements, par exemple, dans le cas de la construction d'un motif en brique ou la confection d'une mosaïque. Dans le cas que nous avons présenté, les dispositifs robotisés sont en mesure de réaliser des actions répétitives d'une manière très précise.

L'effort physique : Le métier d'un forgeron ou d'un tailleur de pierre nécessite une bonne condition physique et la capacité de travailler dans un environnement parfois non confortable. Les moyens numériques de fabrication permettent de réaliser les tâches difficiles et répétitives en offrant aux artisans la possibilité de se concentrer sur les aspects créatifs de leurs métiers.

4.2.2 Le croisement des modèles de tectonique informée pour la conception à base de matière

Nous avons pu constater que les différents exemples partagent, d'abord, l'utilisation des matériaux comme support de la conception et la fusion entre forme, structure et matériaux. Ensuite, un flux d'information continu. Puis, une réorganisation des relations tectoniques. Enfin, l'intégration des procédés de la fabrication dans les processus de la génération des formes. Ce sont les critères par lesquels Oxman (2014) aurait identifié les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux que nous avons utilisés pour répertorier et examiner les différents cas. Nous avons constaté que, souvent, un exemple pourrait obéir à plusieurs modèles tectoniques (Tableau III).

Nous constatons que trois modèles sont les plus fréquents

Le modèle de flux de la conception à la fabrication

Nous avons constaté dans le chapitre 2 que dans la pratique artisanale, il n'existe pas une dissociation entre la caractérisation d'un objet et sa confection. Un artisan fait usage de ses savoir-faire tacites, acquis par l'expérience afin d'opérer directement sur les matériaux. Dans les cas examinés, ce passage immédiat entre conception et matérialisation est assuré par les moyens numériques qui traduisent les caractéristiques en le fabricant par les machines CNC, les bras robotisés ou les imprimantes 3D.

Le modèle de rationalisation :

La rationalisation et l'optimisation des efforts et ressources sont des qualités qu'on trouve chez les maîtres-artisans qui ont atteint un haut degré de maîtrise et perfectionnement après de longues années de pratique. Les moyens numériques peuvent offrir cette qualité à travers des algorithmes d'optimisation (Jang *et al.*, 2007) et la capacité de simuler les comportement des matériaux et les contraintes physiques et environnementales (Ceccato, 2011).

Modèle de la matérialité du numérique :

Ce modèle s'appuie sur la capacité des moyens numériques à intégrer les caractéristiques des matériaux dans la conception d'objets. Nous avons constaté dans les précédents chapitres que la matérialité est une condition de l'existence des savoir-faire artisanaux. Un artisan manipule et transforme la matière en fonction de ses propriétés pour fabriquer un artefact.

Nous avons affilié chaque cas étudié à un modèle de la tectonique informé. Celui auquel le cas répond au mieux à ses critères distinctifs. Ainsi nous pouvons considérer qu'il existe plusieurs échelles d'affiliation à un modèle.

- Affiliation principale : le cas respecte le critère distinctif d'un modèle tectonique.
- Affiliation secondaire : respecte des critères d'un modèle tectonique à l'exception du critère distinctif.

Nous rappelons les critères distinctifs de chaque modèle tectonique utilisé :

- Le modèle de rationalisation : intégrer les procédures de fabrication afin d'optimiser la réalisation de formes complexe (voûtes, coupole, arches, etc.).
- Le modèle des flux de la conception à la production : la continuité des flux d'information entre la conception et la fabrication par des machines à contrôle numériques, des dispositifs robotisés ou les imprimantes 3D.
- Modèle de la fabrication robotisée personnalisée : l'intégration des procédures de fabrication dès la définition des concepts et l'utilisation des dispositifs robotisés pour réinterpréter des actions, souvent répétitives, relatives à un savoir-faire artisanal.
- Modèle des propriétés variables des matériaux : la conception à base des propriétés spécifiques d'un matériau et la fabrication par impression tridimensionnelle.

	Modèle tectonique informée			
	Le modèle de rationalisation	Le modèle des flux de la conception à la production.	Modèle de la fabrication robotisée personnalisée :	Modèle des propriétés variables des matériaux
Rob Arch				
Pavillons ETH				
Gantenbein vineyard Facade				
Robotic tile placement				
Fabrication de moules				
MX3D Bridge				

Tableau III : Affiliation des cas analysés aux modèles tectoniques informés (© Mnejja 2016)

	Principal		Secondaire		Absence
--	-----------	--	------------	--	---------

Légende : Degré d'affiliation des cas analysés au modèle de la tectonique informée

4.2.3 Modèles des processus numériques en architecture

Les moyens de fabrication (bras robotisés, machine CNC, imprimantes 3D) viennent compléter les flux d'informations et contribuer à réaliser le lien entre l'état virtuel et matériel d'un artéfact. Par conséquent, les approches issues des modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux pourraient représenter certains aspects du savoir-faire artisanal, en particulier, la caractérisation d'objets à fabriquer et les processus et outils nécessaires à atteindre ces objectifs.

La modélisation paramétrique est le pilier de l'emploi du numérique dans des pratiques artisanales. Il permet d'utiliser les matériaux comme base de la conception, intégrer toutes les informations pertinentes relatives aux procédures de production et les transférer aux outils numériques de fabrication.

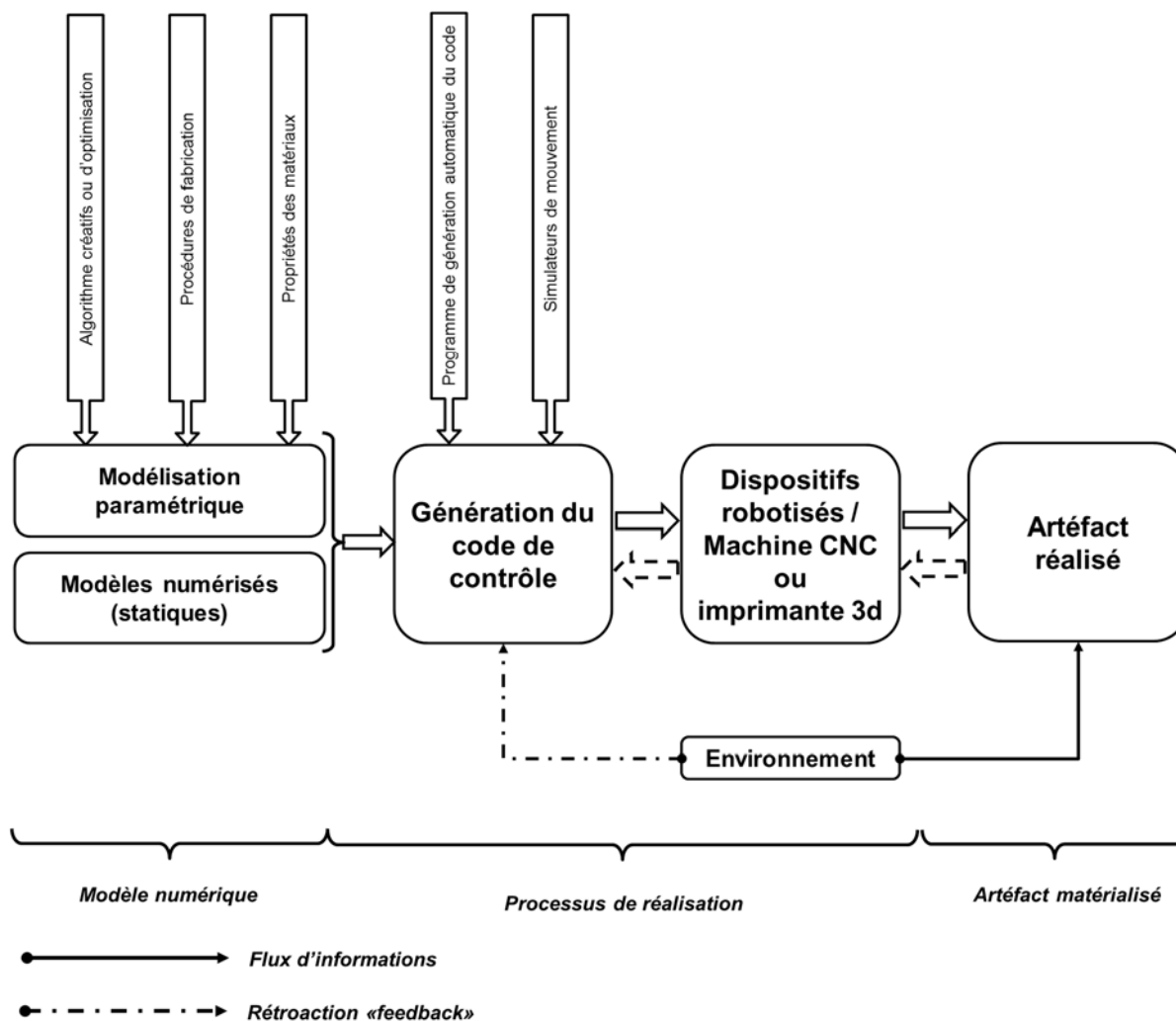


Figure 41 : Modèle général de la matérialisation des savoir-faire techniques en architecture et en construction (© Mnejja, 2016)

4.2.4 Apports et limites des moyens numériques pour les savoir-faire artisanaux en architecture dans un milieu expérimental

Les moyens numériques, particulièrement les bras robotisés et les approches de modélisation paramétriques ont démontré certaines contributions pertinentes aux aspects d'un savoir-faire artisanal relatifs à la caractérisation d'un objet et sa fabrication. Ceci est susceptible, de point de vue théorique, d'assurer la pérennité des savoir-faire artisanaux en architecture, leurs conservations ou transmission. En effet, les moyens numériques permettraient la réalisation des modèles qui seront faciles à adapter à de nouvelles situations. Par exemple, le modèle d'une colonne ou d'une sculpture pourrait être sauvegardé dans des bases de données, transmis à des

collaborateurs, accommodé à d'autres contextes et même construit. Toutefois, il existe encore un grand travail à réaliser pour concrétiser de pareils objectifs, principalement :

- La généralisation de la modélisation paramétrique dans la conception et dans les pratiques artisanales.
- Le développement d'outils numériques de fabrication : les différents instruments que nous avons présentés ont été façonnés spécifiquement pour un usage académique.

Dans la plupart des cas, nous avons déduit que les principaux apports des moyens numériques sont leur capacité de conserver et reproduire un savoir-faire artisanal ; si un dispositif est en disposition de confectionner un tel ouvrage, alors on pourrait l'utiliser dans un contexte qui exige l'intervention d'un artisan. Les outils de fabrication soient efficaces pour la réalisation d'artéfacts d'appartenance artisanale. Cependant, ils ne sont pas toujours en mesure de restituer les mêmes procédés et techniques artisanales.

À travers ce chapitre, nous avons constaté que les moyens numériques ont les capacités de préserver, reproduire et interpréter plusieurs savoir-faire artisanaux en architecture. Ces qualités permettent de compenser le manque ou la rareté des artisans pour des projets de construction ou de restauration. Toutefois, les exemples se sont déroulées en milieu expérimental. Ainsi, il serait intéressant d'examiner les processus leurs points forts et limites dans des environnements plus complexes tels que les projets de construction et de restauration. C'est l'objet de notre travail dans le prochain chapitre.

5 Analyse de cas dans le contexte de projet

La réalité d'un projet de construction ou de restauration est plus complexe qu'une expérimentation dans un milieu expérimental. Plusieurs contraintes entrent en jeu, particulièrement, les coûts, les délais et la planification des travaux. Cette situation nécessite l'adaptation et la réactivité instantanée à toutes les circonstances.

À travers ce chapitre, nous nous intéressons à deux exemples d'utilisation des moyens numériques dans un cadre de projet pour fabriquer des éléments censés être exécutés selon des procédés artisanaux. Cette partie nous permettra de toucher les contributions des moyens numériques dans un contexte réel d'un projet, de constater leurs limites et observer les obstacles à généraliser leur utilisation quotidienne. Nous nous intéressons aux cas de la Sagrada Familia à Barcelone et le parlement canadien à Ottawa. Ce sont deux exemples complémentaires, le premier est relatif à un projet de construction tandis que le second consiste en des opérations de restauration du patrimoine bâti.

Nous étudions les cas en abordant les dimensions suivantes :

- Description du contexte et du déroulement du cas
- Examen des contributions des moyens numériques
- Énumération des outils numériques employés
- Étude de l'affiliation du cas examiné à un modèle de la tectonique informée

5.1 Sagrada Familia

La Sagrada Familia est considérée comme l'un des derniers monuments dont l'édification s'étendait sur plusieurs décennies, voire des siècles. Elle a été initialement conçue par Villar Palau en 1882 selon un style néogothique. En 1883, Gaudí est devenu l'architecte en chef du projet qui le transforme suivant une nouvelle architecture personnelle jamais observée (Alsina i Català *et al.*, 2004).

Ce monument a été confronté à plusieurs obstacles. D'abord, le défaut de financement, son coût astronomique et son manque d'adaptation à la modernité en 1914 (Gómez-Serrano *et al.*, 2009). Ensuite, le décès de Gaudí en 1926. Puis, lors de la guerre civile espagnole, plusieurs

maquettes, documents et esquisses de l'architecte ont été détruits. Enfin, la complexité des formes géométriques et la rareté des artisans qui sont en mesure de continuer les travaux de construction (Halabi, 2015). Ces raisons ont causé le ralentissement et l'arrêt des travaux pendant de longues périodes.

Ce monument est une création inachevée dont on ne connaît pas l'aspect final et qui devrait être réalisé selon des techniques qui sont presque disparus. Un double défi accentué par la complexité des formes et leurs dimensions majestueuses. Toutefois, les nouveaux moyens numériques ont pu accélérer le déroulement des travaux d'édification.

Dans la suite de cette section, nous examinerons les contributions des moyens numériques dans le contexte de rareté du savoir-faire artisanal en architecture nécessaire à la modélisation et la matérialisation de certains éléments de la cathédrale.

5.1.1 Les colonnes de la nef centrale

Description

Mise en contexte

La Sagrada Familia est caractérisée par sa géométrie complexe. En vue de documenter ce projet, Gaudi a combiné des formes polygonales et a réalisé des modèles en plâtre (Figure 42). Il a établi un système de proportions qui permet de définir toutes les mesures du temple (ouvertures, Rosaces, etc.) (Bonet, 2000).

La géométrie des colonnes de la nef centrale demeure non constructible jusqu'aux années 1980 malgré plusieurs tentatives infructueuses (Halabi, 2015). Les collaborateurs de Gaudi connaissaient les tâches à effectuer, mais ils n'ont pas une idée détaillée du déroulement de l'ensemble du processus de réalisation. (Bonet, 2000).

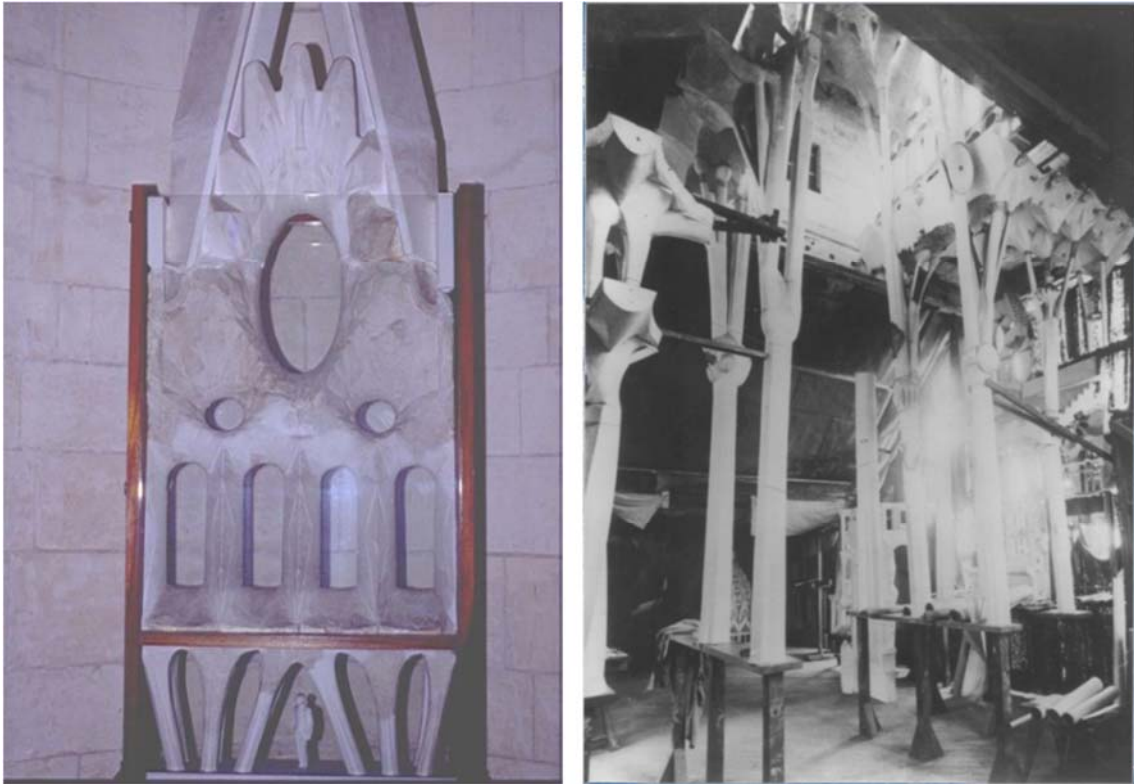


Figure 42 : À gauche, modèle en plâtre de la nef centrale ; à droite, le modèle en plâtre original réalisé par Gaudi de la nef centrale à l'échelle 1/10 (Halabi, 2015, p. 90).

Les colonnes sont conçues par l'utilisation de polygones de formes hexagonales octogonales, décagonales ou dodécagonales inscrites dans des paraboles de coins arrondis. Une colonne pourrait avoir plusieurs sections en fonction de sa hauteur. Les volumes sont obtenus par le balayage en hélice selon un mouvement vers la droite, celles de l'autre côté sont conçues avec le même type de balayage, mais dans le sens contraire (Figure 43).

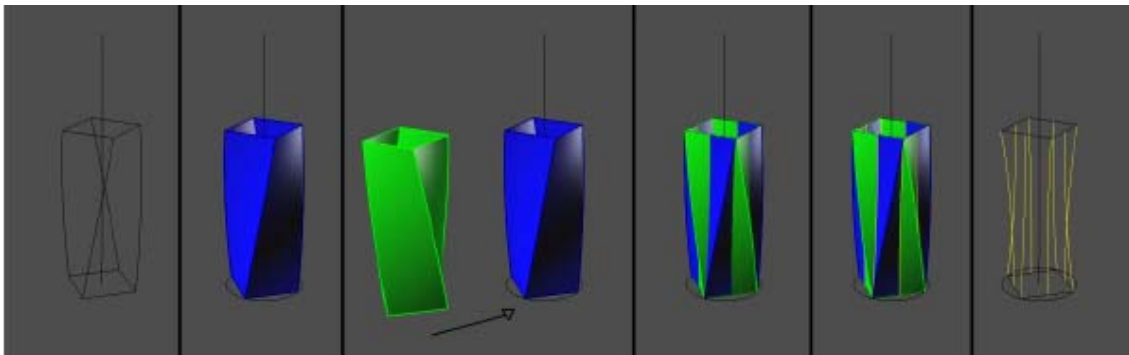


Figure 43 : Principe conceptuel des éléments avec balayage en double hélice (Halabi, 2015, p. 91).

La modélisation des colonnes

Mark Burry a incarné les principes géométriques de la Sagrada Familia et a développé des systèmes paramétriques pour les interpréter et évaluer leur conformité par rapport aux concepts de Gaudi (Burry, 2002). La définition de la forme probable de chaque colonne requiert une recherche qui s'appuie sur des esquisses, des photos des maquettes et particulièrement les principes géométriques de Gaudi. Ces derniers, interprétés par Bonet, se sont révélés très utiles pour les dessiner et les décrire mathématiquement. La réalisation des modèles des colonnes est un processus qui a nécessité le développement et la modification de plusieurs options afin de les adapter aux autres colonnes. Cette modélisation exige le recours à des outils flexibles pour pouvoir effectuer les changements requis sans la contrainte de les remodeler de nouveau.

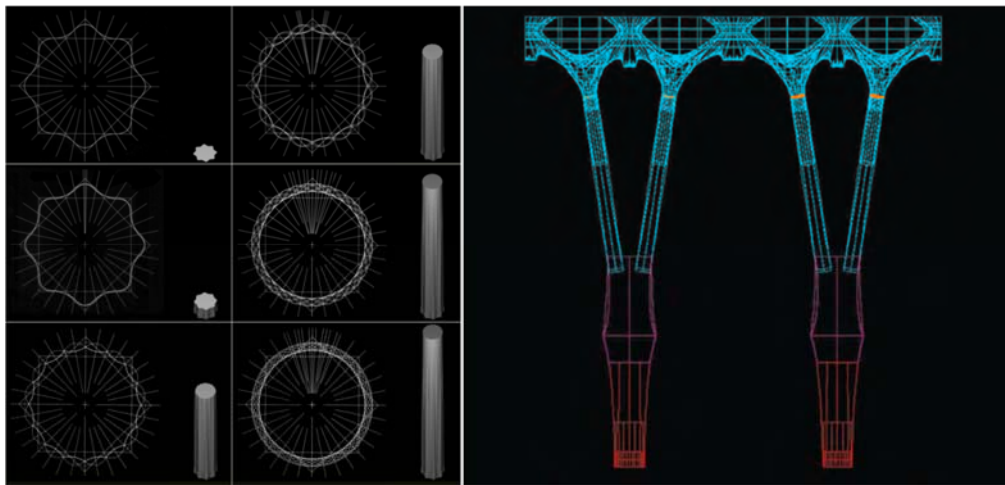


Figure 44 : À gauche, les différentes sections d'une colonne (Halabi, 2015, p. 91) ; à droite, adaptation de la partie supérieure des colonnes (Alsina i Català et al., 2004, p. 20).

Prototypage et réalisation

Gaudi était conscient qu'il existait un grand besoin pour créer de nouveaux outils ingénieux et efficaces pour confectionner des éléments architecturaux de la basilique (Bonet, 2000). L'utilisation des codes alphanumériques permettait de communiquer les propriétés géométriques à des machines à contrôle numérique ou à des robots afin de « matérialiser ces éléments ». Vu la complexité des colonnes et leurs imposantes dimensions, il est nécessaire de les « décomposer » en entités plus petites dans le but de pouvoir les confectionner à l'échelle réelle (Figure 45).

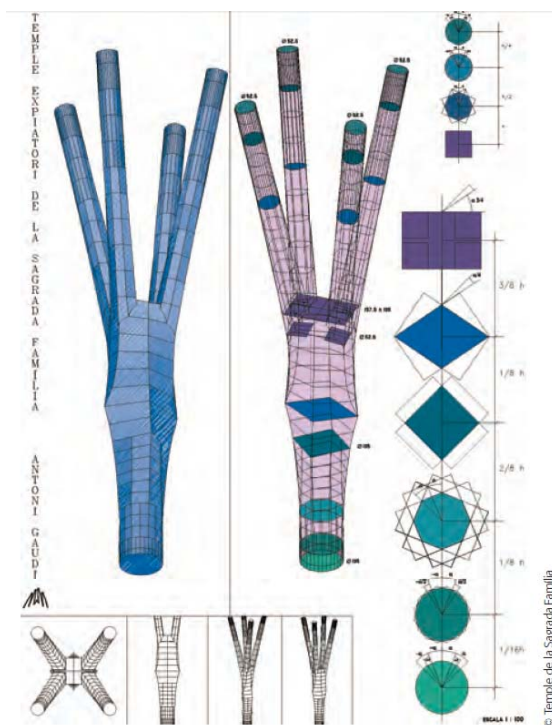


Figure 45 : Décomposition d'une colonne (Alsina i Català et al., 2004, p. 20)

Pour construire ces colonnes, en premier temps, des prototypes à petites échelles ont été confectionnés soit par impression 3D, soit par des procédés soustractifs. Ils servent à tester les jonctions entre les éléments et à expliquer aux artisans les modes d'assemblage des colonnes. Une fois ces prototypes approuvés, le processus de « sculpture » est simulé par ordinateur. Ainsi, il serait possible d'usiner et assembler les différents composants en pierre à l'échelle 1/1 sur site (Figure 47 & Figure 48).

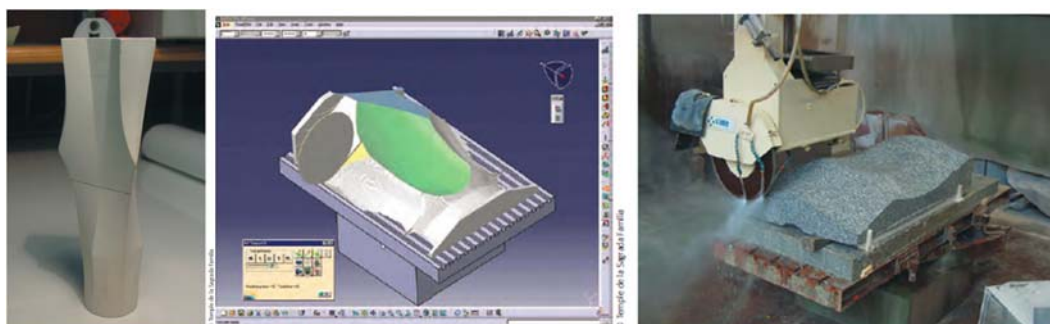


Figure 46 : À gauche, Assemblage des prototypes en gypse des composants d'une colonne ; au milieu, simulation d'usinage ; à droite, la sculpture d'un composant monolithique (Alsina i Català et al., 2004, pp. 22-26-27)



Figure 47 : Vue intérieure de la nef centrale de la basilique (Alsina i Català et al., 2004, p. 27)



Figure 48 : À gauche, la colonne Lleda ; à droite, Sculpture d'une colonne de la façade par un bras robotisé (Halabi, 2015, pp. 93-95).

Les contributions des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux

À travers cet exemple, nous mettons en évidence comment des moyens numériques ont contribué à la définition des formes et la fabrication des colonnes qui ont été supposées produites par des savoir-faire artisanaux.

Gaudi, à son époque, a réalisé plusieurs maquettes afin d'expliquer les formes, les détails et l'organisation des éléments architecturaux de la basilique. Elles servent à préciser les modalités et procédés constructifs. Dans notre cas, plusieurs modèles ont été développés selon l'approche paramétrique ce que facilite leurs modifications et adaptations suivant un processus

récuratif et itératif. Il subit plusieurs changements, variations et ajustements afin de satisfaire les contraintes relatives à l'harmonie de proportion et de style.

Les modèles numériques permettent de générer le code de contrôle des machines CNC et des bras robotisés en vue de fabriquer des prototypes et sculpter les composantes des colonnes qui seront assemblées sur site par les artisans.

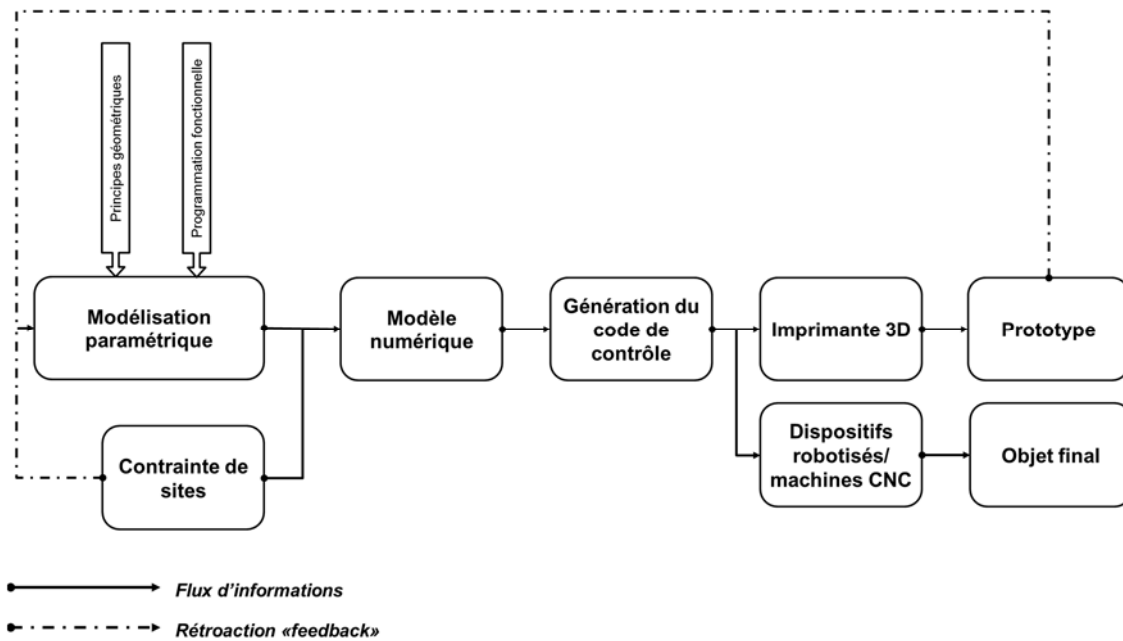


Figure 49 : Processus de matérialisation des colonnes de la Sagrada Familia (© Mnejja, 2016)

Moyens numériques employés

Les moyens numériques utilisés dans cet exemple sont la modélisation paramétrique dans la création des modèles tandis que les machines CNC et les bras robotisés ont servi à la fabrication des composantes des colonnes.

Modèle de la tectonique informée utilisé

Dans ce cas examiné, le flux d'information entre conception et fabrication s'effectuait d'une manière directe. Aussi, il y a eu recours à des bras robotisés afin de reproduire plusieurs gestes d'un sculpteur. Ce sont les caractéristiques des modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux, particulièrement, le modèle des flux d'informations et le modèle de la fabrication robotisée personnalisée. Nous pensons, ainsi, que les utilisations des outils numériques correspondent à ces deux modèles.

5.1.2 La Rosace

Description

Mise en contexte

Nous nous penchons ici sur la Rosace qui composait la façade de la Passion. La conception et la fabrication et l'installation de cette Rosace a eu lieu dans trois endroits différents : (1) le chantier à Barcelone (2) la description géométrique et la modélisation informatique à Sydney et (3) la taille de pierres en Galice. En plus des distances qui séparent les intervenants, les délais sont fixés à 15 mois (janvier 2000 à mars 2001). Et comme dans le cas des colonnes précédemment citées, la forme finale de la Rosace restait à définir (Burry *et al.*, 2001).

Modélisation de la Rosace

La Rosace mesure huit mètres de largeur et 32 mètres de hauteur, des dimensions majestueuses avec une géométrie complexe. Ce sont des contraintes qui rendent la réalisation de cet ouvrage un défi à tout artisan.

La Rosace a été modélisée en fonction d'anciennes esquisses de Gaudi et des modèles en plâtre faits dans les années 1970 par les architectes Puig i Boda et Bonet Gari. Leur composition a été mise à jour à travers l'utilisation d'un système des proportions réalisé par Gaudi (Bonet, 2000). Afin de comprendre les principes sous-jacents, les architectes ont fait référence à la Rosace de la façade de la nativité et aux bas-côtés de la Rosace située à côté de la nef centrale (M. Burry, 1993). Ces éléments sont caractérisés par des articulations sophistiquées entre des surfaces hyperboliques. Tous ces indices ont permis aux différents architectes participants de « déduire » ce que pourrait être cette Rosace (Burry *et al.*, 1996).

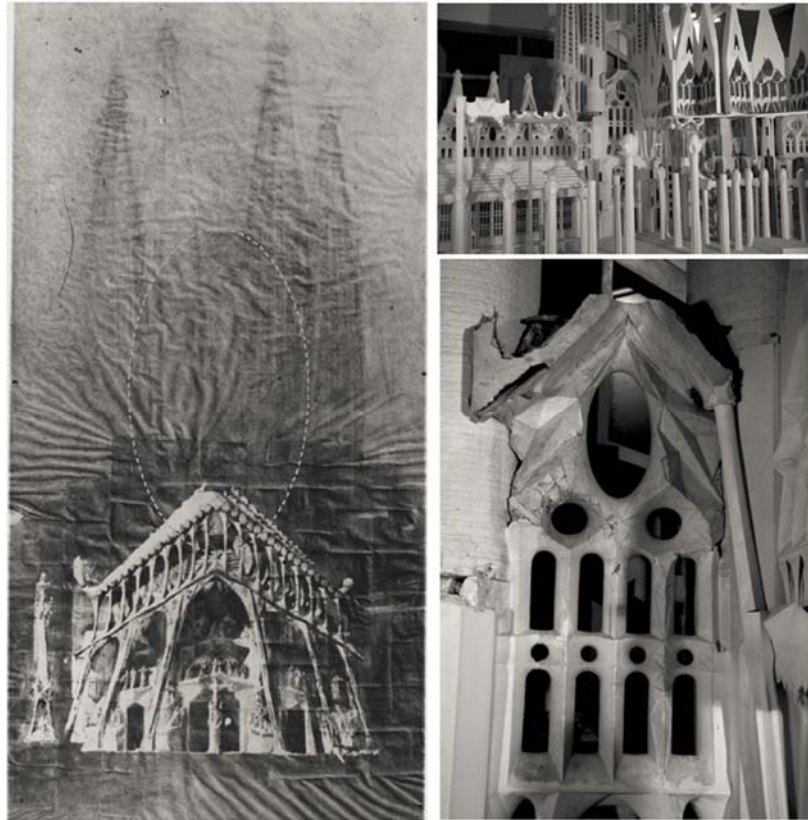


Figure 50 : À gauche, photo d'une esquisse originale de Gaudí ; à droite, des maquettes en plâtre réalisées dans les années 1970s (Burry et al., 2001, p. 78)

La rareté des informations relatives à cet élément architectural et la nécessité de réajuster le modèle de la Rosace exigeaient, comme dans le cas des colonnes, le recours à l'approche paramétrique, jugée flexible et plus adéquate à ce contexte.



Figure 51 : Modèle paramétrique de la fenêtre réalisé par le logiciel (CADD5) (Burry et al., 2001, p. 79)

La modélisation de la Rosace a duré 3 mois pour obtenir un résultat satisfaisant. Son adaptation au site a nécessité plusieurs modifications et réajustements. C'est une tâche facilitée par l'approche paramétrique (Burry et al., 2001).

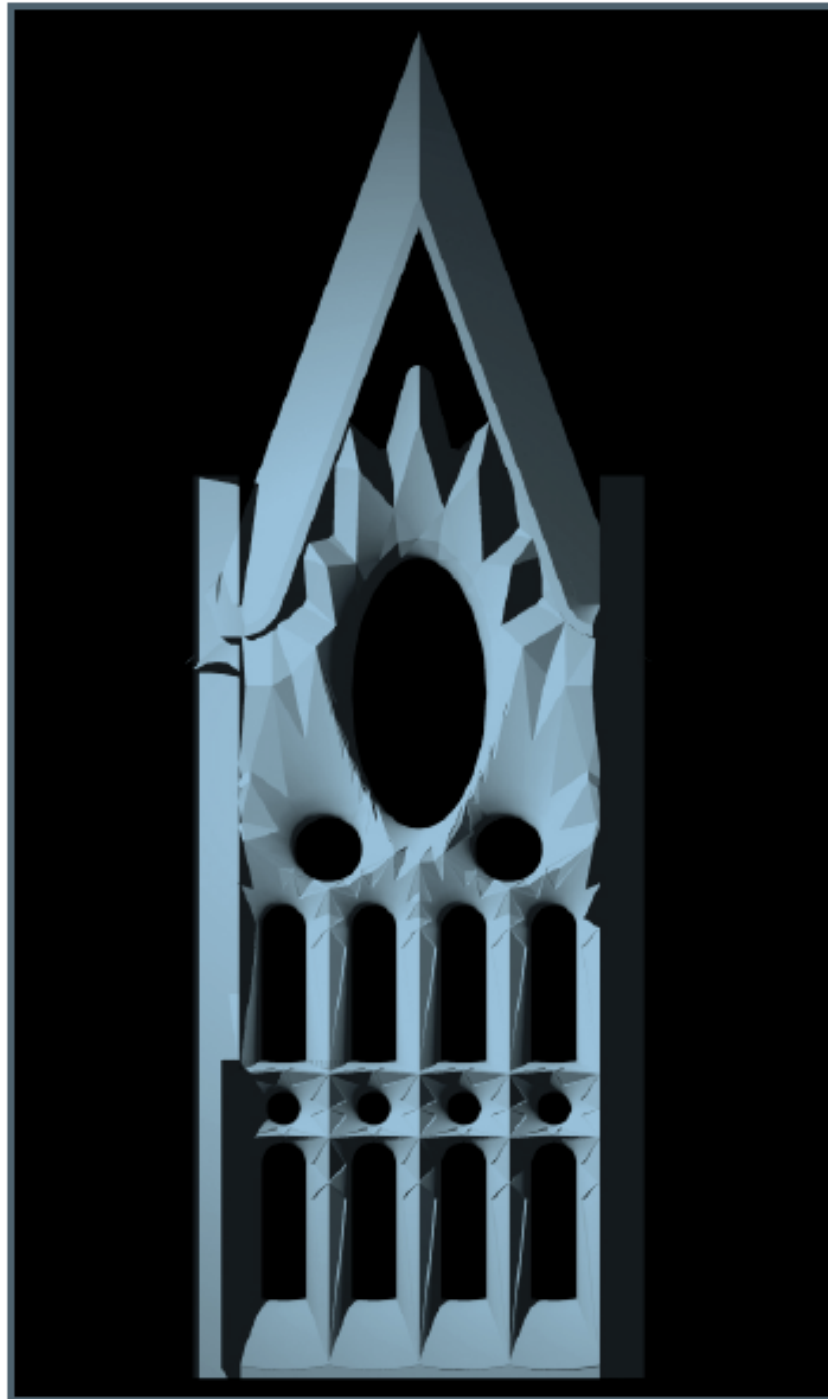


Figure 52 : Modèle 3D de la Rosace (Burry et al., 2001, p. 81)

Prototypage et réalisation

La complexité de la Rosace et ses mesures nécessitent sa décomposition en éléments de grandeurs, volumes et poids « *manipulables* ». Nous avons constaté dans le cas des colonnes que les prototypes à échelle réduite permettent d'évaluer les modes d'assemblage et de fabrication.

Il a été prévu d'imprimer des maquettes. Cependant, le sculpteur en chef de l'opération a préféré confectionner lui-même un modèle en polystyrène plus rapide à réaliser, moins précis, mais offre aux artisans de Galice une compréhension globale et satisfaisante de l'ouvrage (Figure 53). Ce travail de Manuel Mallo a permis de définir la façon de décomposer le modèle numérique. Ce dernier a servi à générer environ 800 plans de découpe à l'échelle 1 : 1 qui ont été utilisés par les artisans-sculpteurs.

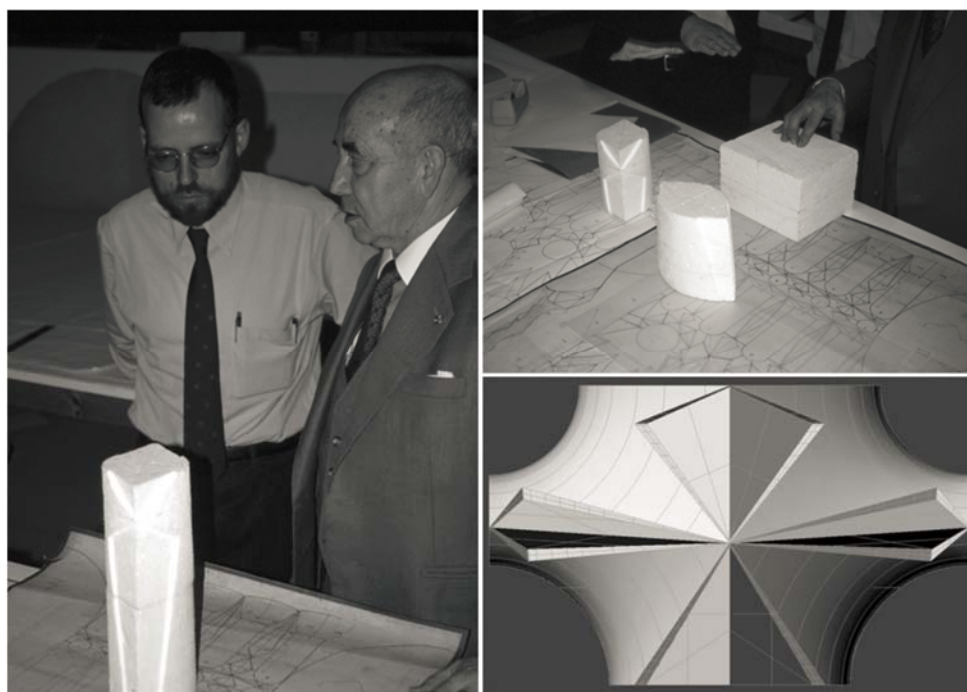


Figure 53 : À gauche, Manuel Mallo (sculpteur) et Jordi Fauli (architecte) avec un prototype ; à droite, des prototypes rapides et un modèle numérique de pierre sculpté (Burry et al., 2001, pp. 81-83).

Manuel Mallo a développé des instruments spécifiques qui utilisaient le fil abrasif pour tailler les surfaces hyperboliques. Certaines de ces composantes de la Rosace ont exigé la confection de prototypes à l'échelle 1/1. L'approche et les dispositifs numériques ont permis de réaliser l'ouvrage dans les délais prescrits (Figure 54).



Figure 54 : Une photo démontrant la précision des éléments réalisés selon des dispositifs numériques (Burry et al., 2001, p. 85).

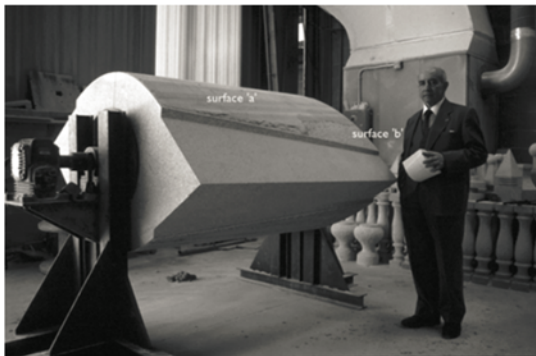


Figure 55 : À gauche, Manuel Mallo près d'un élément typique en pierre ; les quatre colonnes constituant la base de la Rosace ; à droite, un composant de la Rosace (Burry et al., 2001, p. 84).

Les contributions des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux

Ce processus se distingue du précédent par l'absence d'outils automatisés pour réaliser les éléments d'une manière entière ou partielle. Toutefois, la modélisation sert à expérimenter les possibilités formelles de l'objet à construire. Les modèles sont employés afin de produire des prototypes et des documents techniques d'exécution comme des projections orthogonales, des élévations, des plans de coupes, etc.

Dans cet exemple, les artisans ont un rôle important dans le processus de la fabrication des composantes de la Rosace. Ils ont été assistés par les moyens numériques qui leur ont fourni des documents précis et des prototypes explicatifs.

Moyens numériques employés

La Rosace a été conçue par la modélisation paramétrique, cependant, sa production s'est effectuée manuellement.

Modèle de la tectonique informée utilisé

Dans ce cas, le flux d'informations se limite à la réalisation des prototypes et les plans des coupes qui ont servi à produire les composantes de la Rosace. Cet exemple obéit partiellement au modèle des flux de la conception à la construction. (R. Oxman, 2014). Ce processus est partagé entre les moyens numériques et le travail artisanal d'une façon complémentaire. Nous pensons que cet exemple n'est pas affilié à aucun des modèles tectoniques pour la conception à base des matériaux, car la réalisation s'est effectuée d'une manière manuelle.

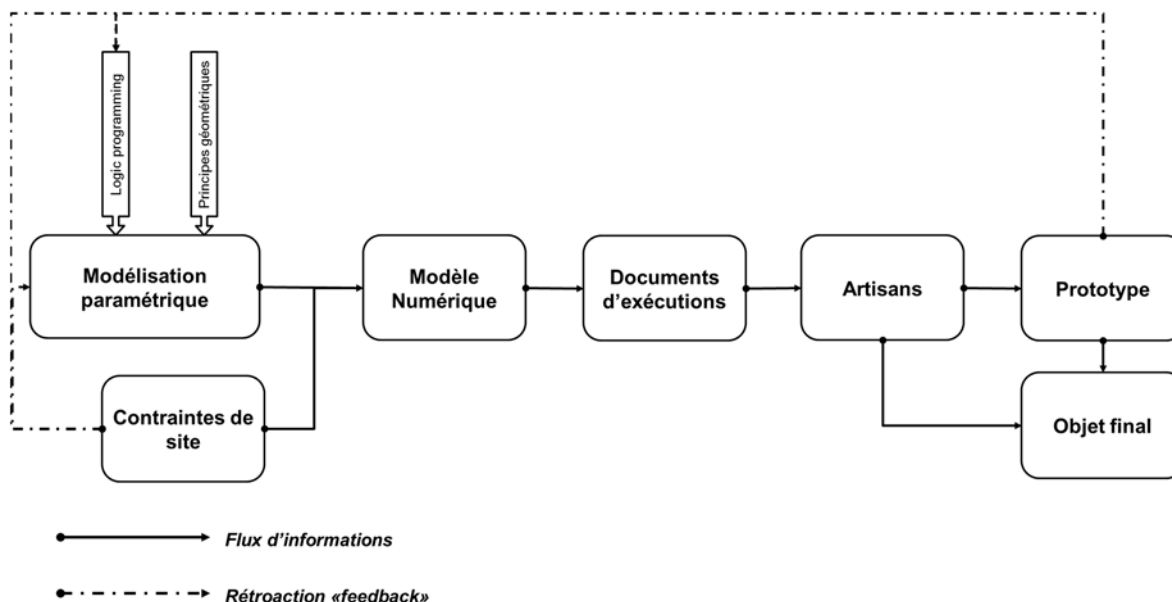


Figure 56 : Processus matérialisation d'une manière créative et réalisation entièrement artisanale (l'exemple de la Rosace - Sagrada Familia) (© Mnejja 2016)

5.1.3 Interprétations et conclusion

La Sagrada Familia, le chef-d'œuvre de Gaudi, si complexe, si grandiose, est une illustration de l'architecture comme génératrice des connaissances et stimulatrice de l'adoption et l'invention de nouveaux outils en construction (Mnejja et Tidafi, 2014). Les architectes, afin de concrétiser les innovations de Gaudi, ont dû employer, adapter et développer des technologies et approches en vue de les assister dans la conception et la production des ouvrages complexes.

Dans les cas exposés ci-dessus nous avons constaté les rôles des moyens numériques pour la conception des différents éléments architecturaux et les façons par lesquelles ces moyens contribuent à les matérialiser. Par rapport aux modèles de la tectonique informée proposés par R. Oxman (2014), celui des flux de la conception à la fabrication correspond au processus présenté à travers le premier cas, celui des colonnes. Cependant, nous signalons que l'intervention des artisans était nécessaire afin de tailler les composantes de la Rosace ce qui limite l'affiliation de second exemple.

Plusieurs moyens numériques ont été utilisés à travers ces deux exemples. La modélisation paramétrique facilite la confection de modèles flexibles et ajustables aux sites. Ces derniers permettent, d'une part, de générer le code de contrôle des machines CNC et des bras

robotisés. D'autre part, ils servent à préparer des plans de coupe et taille qui assistent les artisans dans la confection des objets, une option intéressante en cas d'inadéquation ou indisponibilité des outils de fabrication.

Bien que ces moyens aient démontré leur efficacité dans la production d'éléments complexes d'une manière très précise, ils se montrent limités pour tailler de grands volumes de pierre ou préparer des prototypes.

La principale contribution des moyens numérique se manifeste par la modélisation des savoir-faire artisanaux qui exigent, en plus de connaissance en mathématiques et en géométrie, la maîtrise de la programmation informatique.

L'intervention des artisans demeure toujours nécessaire afin de diriger et compléter les procédures d'édification, les moyens numériques les assistent dans les opérations de conception et de la fabrication.

5.2 Le parlement canadien

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons observé comment les moyens numériques ont été utilisés en vue de concevoir des objets et assister les artisans dans leur confection. Dans cette section, nous examinons l'exemple de la restauration des différents éléments architecturale du parlement canadien. C'est une situation où l'objectif est la reproduction des artéfacts, dont toutes les caractéristiques sont connues d'avance.

5.2.1 Mise en contexte

Le parlement canadien est conçu en 1859, quand Ottawa est devenue la capitale du pays. Il est composé de 3 blocs (est, central et ouest) et d'une bibliothèque en plan circulaire. Depuis presque une décennie, ce monument fait l'objet de plusieurs restaurations qui consistent soit à réparer des éléments endommagés ou les remplacer par des répliques.

La collaboration entre le « Carleton Immersive Media Studio » (CIMS), le sculpteur du Dominion du Canada, la direction de la conservation de l'héritage et Travaux publics et services gouvernementaux Canada a permis d'expérimenter l'utilisation des moyens numériques dans le

contexte de restauration. À travers cette section, nous nous intéressons à l'exemple de « *The owl and thistle* ».

5.2.2 Réinterprétation du savoir-faire artisanal par les moyens numériques

La restauration des sculptures dans le parlement consiste à produire des répliques ; ce processus comprend les étapes suivantes (Hayes *et al.*, 2014) :

- Fabriquer une moule en résine et en plâtre à partir de l'œuvre originale.
- Couler un prototype en argile auquel des « réparations » seront apportées par les sculpteurs-artisans.
- La géométrie du modèle en céramique est transférée point par point par un dispositif « *pointing machine* » (Figure 57)

Ce sont des procédés qui nécessitent beaucoup de temps de travail et pourraient endommager les pièces originales.



Figure 57 : « *pointing machine* » utilisée dans l'atelier du sculpteur de Dominion (Hayes *et al.*, 2014, p. 645)

Ces procédés traditionnels ont été interprétés par Hayes *et al.* (2015) afin de reproduire le savoir-faire artisanal par des moyens numériques. Ils proposent la démarche suivante :

- Acquérir toutes les informations géométriques de l'élément à travers la confection d'un modèle par des scanners laser ou photogrammétrie.
- Confectionner un prototype à l'échelle 1 : 1 par impression tridimensionnelle ou par procédés soustractifs effectués par des machines à contrôle numérique (CNC).
- Le prototype sera transmis aux artisans pour proposer des réparations, en premier temps avant de fabriquer les copies de substitution.

5.2.3 Analyse de cas: The owl and thistle

The Owl and Thistle est une sculpture qui se situe dans le bloc Est du Parlement. Les experts jugeaient qu'elle devait être remplacée par une nouvelle réplique. Son relief a été numérisé par photogrammétrie afin de préparer un modèle servant à fabriquer un prototype en polyuréthane selon un procédé soustractif par une machine CNC. Celui-ci a été utilisé par les sculpteurs pour apporter des « réparations » en argile qui ont été de nouveau numérisées par un scanner laser. Enfin, le deuxième modèle a été sculpté à l'aide d'un robot à 6 axes en gardant une couche supplémentaire de 1,5 mm afin que les artisans puissent ajouter les détails et les textures sur l'ensemble de l'œuvre.



Figure 58 : La sculpture endommagée (Hayes et al., 2014, p. 647)



Figure 59 : Le prototype en polystyrène avec les « réparations » en argile (Hayes et al., 2015, p. 101)

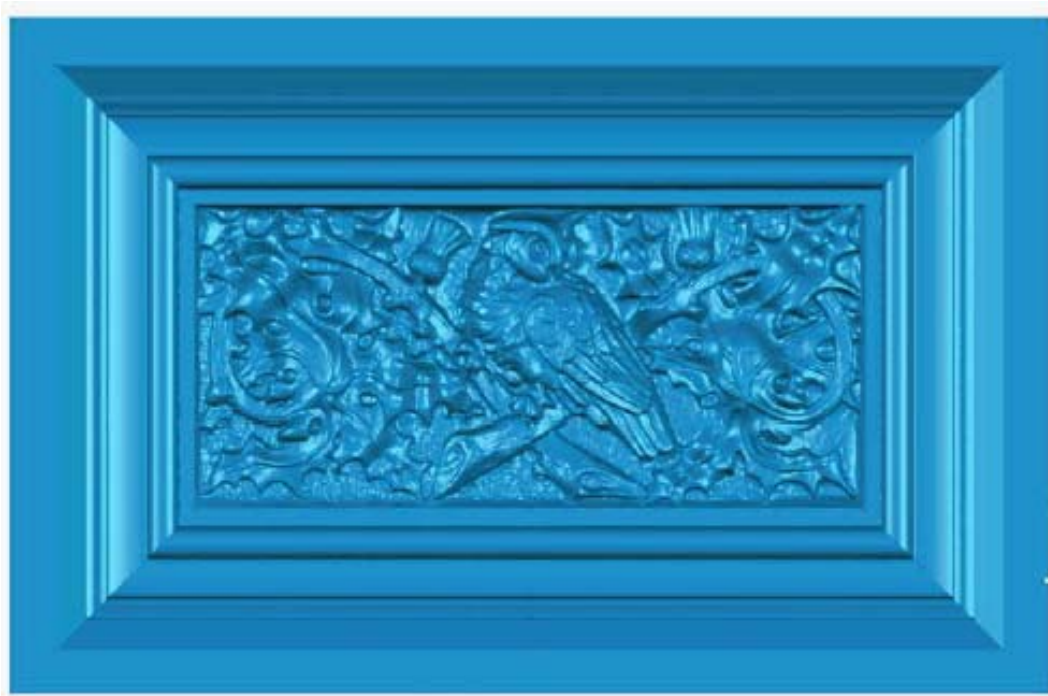


Figure 60 : Le modèle numérique incluant les réparations, réalisé par les sculpteurs (Hayes et al., 2014, p. 648).



Figure 61 : La sculpture en pierre avant l'intervention des sculpteurs (Hayes et al., 2015, p. 102).



Figure 62 : La surface de la sculpture après l'intervention des artisans-sculpteurs.(Hayes et al., 2015)

Les contributions des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux

Lors de ce processus, l'objectif est de confectionner une copie restaurée d'une sculpture existante. Dans ce cas, toutes les caractéristiques de l'artéfact initial sont connues, ainsi, les technologies de la photogrammétrie et les relevés laser permettent de modéliser des objets d'une manière rapide et très fidèle.

La reproduction de la sculpture est assurée par une machine CNC puis un bras robotisé. D'abord, une première réplique a été produite pour apporter des réparations par les artisans, ensuite, une deuxième copie en pierre a été préparée à laquelle des reliefs et textures ont été ajoutés ; ce sont des tâches que, probablement, les outils numériques ne sont pas en mesure de les réaliser.

Moyens numériques employés

Les moyens numériques utilisés dans cet exemple sont la modélisation, en premier, par relevé photogrammétrique, puis par relevé laser pour la création des modèles tandis que les machines CNC et les bras robotisés ont servi pour réaliser une copie en polystyrène puis en pierre de la sculpture.

Modèle de la tectonique informée utilisé

Dans cet exemple, les flux d'information sont divisés en deux étapes successives séparées par l'intervention des artisans. La première consiste à fabriquer un prototype en polyuréthane, tandis que la seconde cherche à réaliser une sculpture par une machine à contrôle numérique.

Les artisans-sculpteurs sont intervenus en deux temps pour effectuer des réparations et pour ajouter une texture au modèle en pierre. C'est une relation de complémentarité entre le travail artisanal et les processus de fabrication numérique. Ces derniers prennent en charge des actions répétitives et celles qui nécessitent un effort physique tandis que les artisans apportent ce que la technologie ne peut pas effectuer.

Les outils utilisés correspondaient au mieux au modèle des flux d'informations pour la première étape tandis que la seconde est plus convenable pour le modèle de la fabrication robotisée.

La Figure 63 illustre la continuité des flux d'informations durant ce processus depuis le modèle initial jusqu'à celui construit. Le modèle numérisé sert à générer le code de contrôle des machines CNC et bras robotisés pour fabriquer le prototype et l'objet préfinalisé.

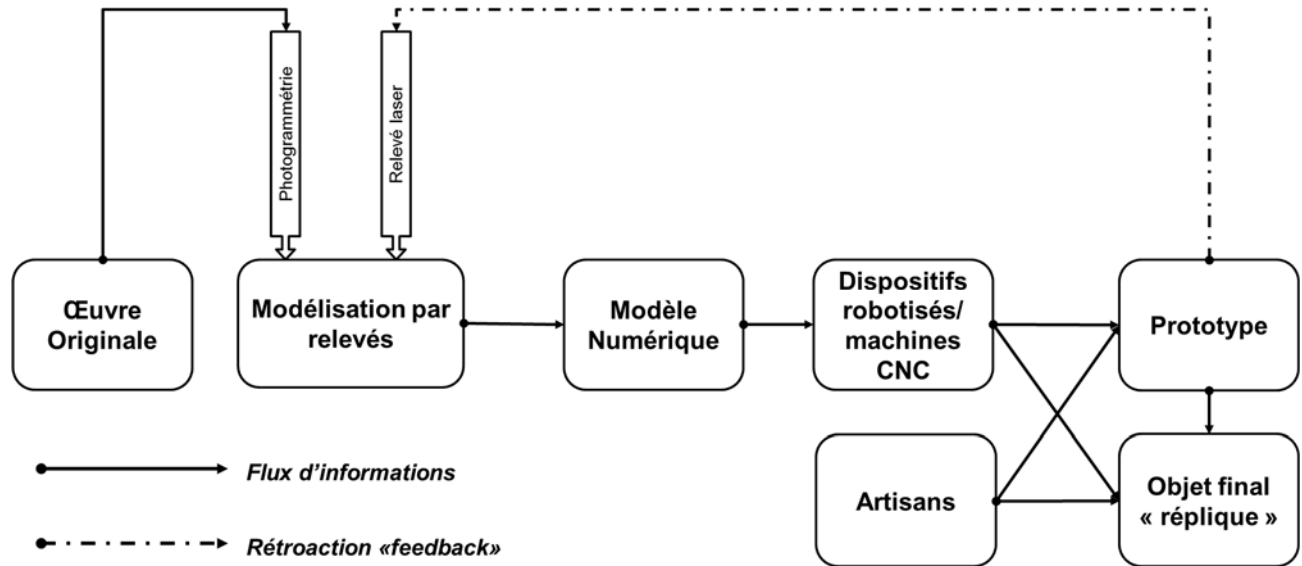


Figure 63 : Processus de reproduction de copie de sculpture avec l'intervention d'artisans.

5.2.4 Interprétations et conclusions

Nous pensons que les principales contributions des moyens numériques pour l'exemple du parlement canadien consistent à reproduire des artefacts et assister les artisans dans leur fabrication. C'est la constatation que nous partageons avec Hayes et al. (2015) qui considère les moyens numériques comme des assistants pour les artisans. Il assimile leur emploi dans le cas du parlement canadien au rôle des apprentis qui avaient auparavant la tâche de préparer des moules ou des copies de l'œuvre.

Au contraire de l'exemple de la Sagrada Familia, les objets à confectionner existaient déjà. Les techniques d'acquisition géométrique telle que la photogrammétrie et lasergrammétrie ont servi à la réalisation des modèles numériques et des prototypes permettent aux artisans d'évaluer le résultat final et de prévoir, si nécessaire, des modifications et ajustements.

La technologie utilisée n'a pas atteint un degré de perfection et d'efficacité pour reproduire d'une façon totale et autonome les savoir-faire artisanaux. Par exemple, pour apporter la texture à l'« *OWL and thistle* » les bras robotisés et les machines CNC ont été

incapables de réaliser. Ce constat pourrait être dû au manque d'outils et d'équipements spécifiques à ce genre d'activités. Nous rappelons que l'utilisation des moyens numériques et particulièrement les robots en architecture est relativement récente et encore à un stade d'expérimentation.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné à travers plusieurs exemples les façons et les utilisations des moyens numériques dans les processus de construction et de restauration. Dans la suite, nous synthétisons les différentes approches d'emploi de ces nouvelles technologies dans un projet ainsi que leurs apports et limites.

5.3.1 Modèles de matérialisation des savoir-faire artisanaux en architecture dans le contexte de projet

Nous avons suggéré qu'un savoir-faire artisanal en architecture nécessite une connaissance des caractéristiques de l'objet et des procédures, techniques et outils pour le réaliser. Nous constatons que le processus de la création d'un artéfact par les moyens numérique comprend 3 étapes : la modélisation, le prototypage et la fabrication.

La modélisation numérique : elle a été effectuée par relevés (laser ou photogrammétrie) dans le cas de reproduction de copies identiques telle que la sculpture de « *the OWL and thistle* ». Si l'élément est inconnu, il sera conçu selon des hypothèses et concepts, dans ce cas la modélisation paramétrique est une approche flexible qui intègre des informations relatives aux procédés de construction, des algorithmes de création de formes et qui facilite la modification et l'adaptation des objets en fonction de la situation désirée.

Le prototypage : consiste à produire des modèles à échelle réduite ou réelle en matériaux légers et peu onéreux comme le plâtre, le polystyrène, la mousse rigide, etc. Ces modèles permettent d'avoir une idée de la forme et comprendre les modes d'assemblage et d'agencement. Les prototypes peuvent être imprimés ou usinés par les machines CNC, les bras robotisés ou par les artisans.

La fabrication de l'objet final : elle peut être automatique ou artisanale. Les modèles numériques ont permis, dans les exemples des colonnes et de la sculpture du parlement de générer le code de contrôle des machines CNC ou des bras robotisés. Cependant, ils se sont limités à produire des documents d'exécution pour réaliser la Rosace de la Sagrada Familia.

Le processus de fabrication des objets artisanaux dans un projet est loin d'être linéaire, elle nécessite des rétroactions et des ajustements du modèle numérique. De même, il pourrait exiger une intervention artisanale.

Exemple	Savoir-faire artisanal	Phase	Matériau	Outils utilisés	Nature de procédé
Colonnes de la nef centrale (Sagrada Familia)	Taille et sculpture de pierres	Modélisation		Modélisation paramétrique	Créatif
		Prototype	Gypse	CNC	Soustractif
			Résine	Impression 3D	Additif
		Fabrication finale	Pierre	CNC & bras robotisés	Soustractif
La Rosace (Sagrada Familia)	Taille et sculpture de pierres	Modélisation		Modélisation paramétrique	Créatif
		Prototype	Polystyrène	(Manuel*)	Soustractif
		Fabrication finale	Pierre	CNC à fil abrasif	Soustractif
The Owl and Thistle (parlement Canadien)	Sculpture sur pierres	Modélisation		Photogrammétrie / lasergrammétrie	Relevé
		Prototype	Polystyrène	CNC	Soustractif
		Fabrication finale	Pierre	Bras robotisé	Soustractif

Tableau IV : matérialisation des savoir-faire artisanaux en architecture dans le contexte de projet. (© Mnejja 2016)

5.3.2 Les types des processus de la matérialisation des savoir-faire artisanaux dans un projet

Les différents exemples étudiés nous ont illustré les processus de matérialisation par des moyens numériques dans des projets de construction ou de restauration en architecture exigeant le recours à des savoir-faire artisanaux.

Concernant la fabrication, elle pourrait être de trois types (1) d'abord, totalement automatisée, réalisée par des machines CNC ou des bras robotisés ; (2) ensuite, artisanale, en s'appuyant sur des plans et descriptifs extraits à partir des modèles numériques ; (3) enfin, hybride, lorsque les moyens numériques de fabrication et l'intervention des artisans sont combinés ou employés simultanément. Nous pouvons justifier ces limites par le manque d'outils appropriés, par exemple, l'utilisation des bras robotisés est encore dans un cadre expérimental et académique.

5.3.3 Contributions des moyens numériques

À partir de l'examen de différents cas à travers ce chapitre, nous avons dégagé les principales contributions de moyens numériques dans le contexte de projet de construction ou de restauration qui nécessite le recours à des savoir-faire artisanaux. Nous énumérons les points suivants :

- Assister les artisans par la réalisation d'une partie de travail, nous rappelons l'exemple de la sculpture « *The OWL and Thistle* » où les artisans ont apporté des corrections à un prototype en polyuréthane avant d'ajouter un relief à l'œuvre confectionnée par des bras robotisés.
- Les moyens numériques peuvent intégrer des principes conceptuels afin de modéliser des objets qui pourront être adaptés à des environnements complexes. L'exemple de la Rosace et des colonnes à la Sagrada Familia a permis aux architectes d'explorer plusieurs possibilités en vue de proposer une solution satisfaisante.
- Les moyens numériques sont en mesure de produire des copies identiques de plusieurs œuvres grâce à la modélisation à partir des relevés laser ou

photogrammétrie et l'exécution par des outils numériques. (L'exemple de la sculpture au parlement canadien)

- La possibilité d'opérationnaliser les procédures de fabrication d'objet. Par exemple, les modèles numériques ont permis de réaliser des documents pour assister les artisans à travers des plans de taille de pierre relatifs aux composantes de la Rosace.

En résumé, d'après les cas que nous avons examinés nous pensons que les moyens numériques pourraient contribuer à la préservation des savoir-faire artisanaux en architecture et présenter une solution pertinente à la rareté des artisans. En effet, la capacité de fabriquer de réaliser des pièces artisanales est une manière de préserver les savoir-faire artisanaux qui ont été toujours conditionnés par une production matérielle. Cependant, nous estimons qu'il existe encore des développements à effectuer en ce que trait des outils numériques de fabrication qui pourront être perfectionnés et diversifiés davantage.

6 Conclusion générale

L'objectif de notre recherche est d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

« Comment les moyens numériques permettent-ils de reproduire certains procédés ou artefacts artisanaux en architecture, et quelles sont leurs caractéristiques selon les modèles de la tectonique numérique proposés par Oxman? ? »

À travers ce mémoire, nous avons constitué un recueil des moyens numériques et d'approches qui pourraient être employés dans un contexte qui nécessite le recours à des savoir-faire artisanaux en architecture. Ensuite, nous avons observé certains exemples dans un milieu expérimental, puis dans le cadre de projets de construction et de restauration.

6.1.1 Principaux résultats de la recherche

6.1.2 Les modèles de matérialisation par le numérique et savoir-faire artisanaux

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes appuyés sur les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux en architecture proposés par R. Oxman (2014) qui illustrent des modèles de convergence entre les développement du numérique et la fabrication.

Les cas examinés nous ont permis d'énumérer les contributions possibles des moyens numériques dans la conception et la fabrication en architecture. Nous nous sommes appuyés sur un ensemble de cas réalisées dans des milieux expérimentaux et nous avons identifié les savoir-faire artisanaux qui peuvent y être associés. Ainsi, nous avons décelé les principales contributions suivantes :

La production d'artéfacts à caractère artisanal :

Dans ce cas, les moyens numériques contribuent à la fabrication des objets suivant des méthodes autres que les procédés artisanaux. Le modèle des propriétés variables des matériaux est représentatif de cette démarche. Ce modèle permet de mettre en œuvre les matériaux d'une

manière différente de la façon traditionnelle. L'exemple de l'impression métallique proposé par MX3D.

La capacité de reproduction des savoir-faire artisanaux : dans ce cas, les moyens numériques permettent de réaliser des objets selon des processus qui s'inspirent des procédés artisanaux. Ils peuvent répéter des opérations comme positionner des carreaux de céramiques ou sculpter. Nous pensons que dans cette situation, les exemples répondaient au mieux aux spécificités des modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux suivants :

- Le modèle des flux de la conception à la production
- Le modèle de la fabrication robotisée personnalisée

Dans tous les cas examinés, la modélisation paramétrique est le pilier de ces processus, elle permet d'intégrer des informations relatives aux procédés de construction et assurer une continuité des flux d'informations jusqu'à la production par des dispositifs numériques appropriés

Dans le cas de milieux non expérimentaux comme les chantiers de construction ou de restauration, le principal apport des moyens numériques que nous avons constatés est celui d'assister les artisans dans le processus de matérialisation par :

- La réalisation de modèles numériques flexibles et précis soit par relevé soit par la modélisation paramétrique
- La préparation des documents qui aident les artisans à fabriquer les artefacts
- La fabrication des objets d'une manière partielle ou entière

Le Tableau V résume l'affiliation des cas analysés aux modèles tectoniques informés d'Oxman

	Exemple	Modèle tectonique informée			
		Le modèle de rationalisation	Le modèle des flux de la conception à la production.	Modèle de la fabrication robotisée personnalisée :	Modèle des propriétés variables des matériaux
Cas Expérimentaux	Rob Arch				
	Pavillons ETH				
	Gantenbein vineyard Facade				
	Robotic tile placement				
	Fabrication de moules				
	MX3D Bridge				
Cas de Projet	Nef centrale de la Sagrada Familia				
	Rosace de la Sagrada Familia				
	The owl and thistle				

Tableau V : Affiliation des cas analysés aux modèles tectoniques informés (© Mnejja 2016)

	Principal		Secondaire		Absence
--	-----------	--	------------	--	---------

Légende : Degré d'affiliation des cas analysés au modèle de la tectonique informée

Nous avons pu répertorier les moyens numériques en fonction de leurs rôles dans les processus de matérialisation. Ainsi, nous distinguons les catégories suivantes :

Les outils de relevés : la photogrammétrie et les scanners laser réalisent des relevés précis et détaillés des ouvrages à reproduire ou à restaurer.

Les outils de modélisation : l'approche paramétrique permet de préparer des modèles flexibles et facilement ajustables aux situations complexes d'un projet.

Les outils de fabrication : les bras robotisés sont plus adaptés au travail artisanal. Ils ont plus de liberté et un rayon d'action plus important que les machines CNC ou les imprimantes 3D ils sont polyvalents et peuvent être équipés de différents types d'outils personnalisés et spécifiques.

6.1.3 Apports des moyens numériques

À travers les cas examinés dans notre recherche, nous avons pu constituer un portrait des apports des moyens numériques au savoir-faire artisanal en architecture.

La transférabilité du savoir-faire artisanal en architecture

Apprendre à réaliser une mosaïque ou sculpter un chapiteau nécessite de longues années de pratique. La transcription de ces connaissances en modèles paramétriques, algorithmes, etc. facilite la diffusion et la conservation des savoir-faire artisanaux puisque c'est une manière de les rendre disponibles auprès des architectes, archéologues, artisans, etc. c'est une forme pour encapsuler des savoir-faire et des action sous formes de scripts ou d'objet adaptables et réutilisables, ce que permettrait d'éviter la « réinvention de la roue ». Par exemple, pour sculpter un nouveau chapiteau il suffirait d'utiliser un modèle existant et modifier certains paramètres tels que les dimensions ou la forme et les réadapter aux contraintes de nouvel élément à produire.

Précision et rapidité

Les outils numériques de fabrication (bras robotisé, machine CNC, imprimantes 3D, etc.) permettent une grande précision, une conformité parfaite avec les modèles conçus, une rapidité d'exécution et le respect des délais souvent restreints.

Mise en valeur et exploitation du savoir-faire artisanal

Les moyens numériques mettent à disposition les savoir-faire artisanaux sous forme qu'il pourrait être réutilisé et adaptée à de nouveaux contextes. Cette qualité permet de les réinterpréter selon une approche créative. Ainsi il serait possible de réemployer ou intégrer des artefacts à caractère artisanal dans les projets d'architecture en se basant sur des modèles paramétriques.

6.1.4 Obstacles à l'utilisation des moyens numériques

Le caractère tacite des savoir-faire artisanaux en architecture

Dans le contexte de chantier, le développement de prototypes et l'intervention des artisans sont quasi systématiques. Ce constat pourrait confirmer l'aspect tacite des savoir-faire artisanaux en architecture. Il y a toujours une dimension spécifique et particulière que les moyens numériques ne réussissent pas à modéliser ou à reproduire. Par exemple, les artisans ont apporté les réparations sur le prototype réalisé en premier temps avant de compléter la sculpture de la réplique de « *the OWL and thistle* ».

Investissements importants

Si les outils informatiques et les imprimantes 3D se sont démocratisés dans les dernières années, les machines CNC et les bras robotisés nécessitent des investissements énormes pour acquérir les équipements. C'est l'une des raisons qui restreignent leur utilisation dans un cadre expérimental relatif à des projets de recherche académiques.

Manque d'instruments adaptés

Dans tous les cas analysés, particulièrement ceux du chapitre 5, tous les outils rattachés à des bras robotisés ont été développés spécifiquement aux expériences. En effet, il n'existe pas d'instruments standard, d'où l'impératif de les créer et les personnaliser afin de les employer en architecture. C'est un processus onéreux qui nécessite beaucoup de recherche et développement.

Méconnaissance en informatique

L'utilisation des outils informatique en architecture remonte aux années 1980 pour dessiner ou réaliser des modèles 3D. Cependant, la capacité de programmer et construire des modèles paramétriques demeure limitée à certains groupes de recherche ou quelques agences d'architecture.

6.1.5 Relativité des modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux

Dans notre recherche nous nous sommes appuyés sur les modèles de la tectonique informée pour la conception à base de matériaux pour étudier les contributions des moyens numériques aux savoir-faire artisanaux. Ces modèles permettaient dans certaines mesures de simuler les processus artisanaux par la continuité des flux d'informations entre la conception et la fabrication.

Bien que les moyens numériques soient en mesure de reproduire certains aspects des savoir-faire artisanaux, nous avons constaté que les exemples étudiés pourraient être affiliés à plusieurs modèles de la tectonique informés.

6.2 Limites de la recherche

Notre recherche s'intéresse à examiner les manières par lesquelles les moyens numériques peuvent faire face à la rareté des artisans et la perte de leur savoir-faire en architecture. Elle a scruté les apports possibles de ces moyens en ne s'appuyant pas sur des observations directes. Nous nous sommes limités aux publications et aux résultats d'expériences de l'utilisation du numérique dans un usage créatif et contemporain, un contexte qui n'a pas comme un objectif principal l'étude des pratiques des moyens numériques relatifs à des savoir-faire artisanaux en architecture.

Tous les cas sont issus d'un contexte expérimental et académique. Même les exemples de la Sagrada Familia et du parlement canadien ont été réalisés par des groupes de recherche universitaire qui n'ont pas les contraintes d'un artisan ou d'une entreprise de construction.

Les exemples étudiés dans le contexte d'un projet ont abordé uniquement des savoir-faire artisanaux relatifs au travail de pierres. Nous n'avons pas pu examiner les apports des moyens numériques pour d'autres matériaux pour la restauration ou la construction en architecture.

La notion de savoir-faire artisanal en architecture est complexe et a plusieurs dimensions tacites que les moyens numériques, au moins jusqu'à présent, ne soient pas encore en mesure de les reproduire ou combler leurs pertes. Nous nous sommes limités à examiner leurs capacités par rapport à des objets similaires.

6.3 Perspectives de développement :

Si l'utilisation des moyens numériques dans la conception en architecture a atteint une certaine maturité, le déploiement des outils de fabrications, particulièrement robotisés, est encore expérimental

La réinterprétation et réintégration des savoir-faire artisanaux

Nous avons constaté durant notre recherche que les moyens numériques reproduisent des processus et objets artisanaux. Ceci permettrait aux concepteurs et particulièrement les architectes de réintroduire des éléments à inspiration artisanale comme des sculptures ou gravures. En plus, il serait très intéressant de réinterpréter plusieurs techniques artisanales d'une manière créative. Ceci pourrait engendrer le développement d'autres façons de faire et l'apparition de nouveaux styles en architecture et en design.

Mener des recherches sur la base des données primaires

Notre travail s'est appuyé sur des données secondaires ; les résultats de recherches et d'expériences menées dans différents contextes. Nous avons pu démontrer le potentiel des moyens numériques pour reproduire des processus et objets artisanaux. Il serait très intéressant d'examiner leurs apports pour des métiers qui utilisent différents matériaux. Par exemple, nous pouvons étudier comment ces moyens peuvent recréer les motifs en briques des murs à Montréal.

Perfectionnement de la technologie

Dans plusieurs cas examinés, particulièrement ceux en contexte de projet de construction et de restauration, nous avons constaté qu'il y a eu recours aux artisans à cause du manque d'outillage adapté. Des recherches multidisciplinaires futures en architecture, design et ingénierie pourront stimuler la conception d'instruments efficaces. Elle pourrait être sous forme d'une interprétation « robotisée » des outils artisanaux.

La relation Homme-Machine :

L'utilisation des instruments numériques et robotisés en architecture et en construction pose de nouvelles problématiques relatives à la relation (hommes-machine). Serait-il une relation de remplacement de la main-d'œuvre ou une forme d'assistance à la créativité des concepteurs afin d'expérimenter de nouvelles formes d'expression ?

6.4 Pour finir

L'utilisation des outils de fabrication numériques, particulièrement les robots, est en train de changer les modes de production ce que pourraient engendrer des transformations sociales et économiques telles que la relocalisation des usines et le licenciement d'un grand nombre d'ouvriers peu qualifiés. Nous pouvons nous estimer à l'aube d'une nouvelle révolution similaire à la révolution industrielle ou à la révolution de numérique.

Notre recherche a examiné diverses façons par lesquelles les moyens numériques peuvent contribuer à résoudre les problèmes de rareté d'artisans et le déclin des savoir-faire artisanaux en architecture. L'analyse des cas réalisés en milieu expérimental a démontré que les moyens numériques ont les capacités de reproduire plusieurs aspects des savoir-faire artisanaux. Cependant, les exemples dans le contexte d'un projet de construction ou de restauration ont révélé que l'intervention des artisans demeure nécessaire, et ceci à cause du caractère tacite des savoir-faire artisanaux et d'absence d'outils appropriés. Les moyens numériques sont très efficaces pour préparer des modèles précis et des prototypes, produire les documents d'exécution et réaliser plusieurs tâches de fabrication.

Notre recherche a démontré qu'il serait intéressant d'expérimenter les moyens numériques pour reproduire des savoir-faire artisanaux en architecture, utiliser différents matériaux ou simuler des métiers artisanaux dans d'autres disciplines.

Nous pensons que ces nouvelles façons de construire ne vont pas uniquement contribuer à résoudre le problème de rareté des artisans spécialisés, mais contribueront à changer radicalement l'industrie de la construction.

Bibliographie

- Alsina i Català, C., Faulí, J., & Gómez i Serrano, J. (2004). La Geometria i la mecànica a l'obrador de Gaudí. *Revista de tecnologia*, 12-27.
- Arbousse-Bastide, T. (2006). *La transmission des savoir-faire en Bretagne*. Retrieved from <http://www.civam-bretagne.org/imgbd/File/Tab%20Transmi/Transmission%2001.pdf>
- ARTisanat.ch. (2011). LISTE DES MÉTIERS DE L'ARTISANAT D'ART DÉJÀ DISPARUS OU EN VOIE DE L'ÊTRE. Retrieved from <http://www.artisanat.ch/reportages/15-liste-des-metiers-de-l-artisanat-d-art-deja-disparus-ou-en-voie-de-l-etre.html>
- Artisengineering. (2015). 3D printing with a robot. Retrieved from <https://vimeo.com/118013223>
- Bechthold, M. (2010). The return of the future: a second go at robotic construction. *Architectural Design*, 80(4), 116-121.
- BEGRICHE, R. (2003). PROFIL—du nuage de points au modèle 3D. *Mémoire de DEA, MAP-CRAI, Nancy*.
- Beth, M. (2007). Module Maçonnerie. Retrieved from <http://www.arbio.ch/> website: http://www.arbio.ch/Articles/Module_maconnerie.pdf Retrieved from http://www.arbio.ch/Articles/Module_maconnerie.pdf
- Blistène, B. (1999). *une histoire de l'art au XX e siècle*: Paris, Beaux arts magazine-hors-série, Centre Pompidou.
- Bock, T., & Linner, T. (2015a). *Robot oriented design*: Cambridge University Press.
- Bock, T., & Linner, T. (2015b). *Robotic Industrialization*: Cambridge University Press.
- Bonet, J. (2000). *L'últim Gaudí. El modulat geomètric del Temple de la Sagrada Família. The essential Gaudí. The geometric modulation of the Church of the Sagrada Família*: Portic.
- Bourassa, B., Serre, F., & Ross, D. (1999). *Apprendre de son expérience*: Puq.
- Brell-Cokcan, S., & Braumann, J. (2013). *Rob| Arch 2012: Robotic fabrication in architecture, art and design*: Springer Science & Business Media.
- Browell, B. (2014). MX3D-Metal could be a fabrication game-changer. Retrieved from http://www.architectmagazine.com/technology/a-3d-printer-that-constructs-metal-structures-in-mid-air_o
- Burry. (2002). Gaudí and Information Technology: an architecture of real absence and virtual presence. *Gaudi 2002: Miscellania*, 200-215.
- Burry. (2013). *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming: Architectural Design and Programming*: John Wiley & Sons.
- Burry, Burry, J., & Faulí, J. (2001). *Sagrada Família Rosassa: Global computeraided dialogue between designer and craftsman (overcoming differences in age, time and distance)*. Paper presented at the Reinventing the Discourse-How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture-Twenty First Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture (ACADIA).
- Burry, Coll, Gómez, & Melero. (1996). *La Sagrada Família: de Gaudí al CAD*: Ed. UPC, Univ. Politècnica de Catalunya.
- Burry, M. (1993). *Expiatory Church of the Sagrada Família: Antoni Gaudí*: Phaidon Inc Ltd.
- Ceccato, C. (2011). 13 Rapid practice expansion through strategic design computation. *Distributed Intelligence In Design*, 201.

- Charbonneau, N. (2009). Le recours à des environnements numériques pour la diffusion de connaissances relatives au patrimoine bâti: une exploration du potentiel de la modélisation de systèmes typologiques.
- Chevallier, D. (2016). *Savoir faire et pouvoir transmettre: transmission et apprentissage des savoir-faire et des techniques*: Éditions de la Maison des sciences de l'homme.
- Cheviron, N. T. (2012). Kültür, Turizm ve Şehir: İstanbul'un Yeni Bir Kentsel İmaj Arayışı. *İleti-ş-im*, 16(16).
- Clifford, B., Ekmekjian, N., Little, P., & Manto, A. (2014). Variable Carving Volume Casting *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 3-15): Springer.
- Crépeau. (2010). Comment réaliser une mosaïque romaine. Retrieved from <http://www.coupdepouce.com/vacances-fetes/bricolage/comment-realiser-une-mosaïque-romaine/a/33433>
- Creswell. (2007). *Qualitative inquiry & research design: Choosing among five approaches*: Sage Publications, Inc.
- Creswell. (2009). *Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3rd ed.). Thousand Oaks: Sage Publications.
- Cross, N. (2008). *Engineering design methods : strategies for product design*. Chichester, England; Hoboken, NJ: J. Wiley.
- David, G.-F. (2012). Artisanat, métiers et compagnonnage: la transmission des savoirs de l'oralité à l'écrit: le rôle des marchés, traités et encyclopédies.
- Davis, H. (2008). Form and Process in the Transformation of the Architect's Role in Society. *Philosophy and Design*, 273-285.
- Deforge, Y. (2006). La transmission et la préservation des savoir-faire et les enseignements techniques.
- Derieux, D. (2004). L'archéologie du bâti en Europe: comparaison entre la France et la Suisse. *Les Nouvelles de l'archéologie*(95), 47-50.
- DESIGN-TO-PRODUCTION. (2010). Kilden Performing Arts Center. Retrieved from <http://www.designtoproduction.com/projects.en?kilden>
- Duro-Royo, J., Mogas-Soldevila, L., & Kayser, M. (2015). Pneumatic Biomaterials Deposition. Retrieved from http://www.defap.fr/actualites/archives/2014/avril/tunisie-nouvelles-de-printemps-de-lecole-kallaline...-en-images/0414-victor-minard10.jpg/image_preview
- Fares, K. (2012). *L'industrialisation du logement en France (1885-1970): De la construction légère et démontable à la construction lourde et architecturale*. Paris, CNAM.
- Fuchs, A. (2006). *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique*. Nancy 1.
- Gardiner, J. B., & Janssen, S. R. (2014). FreeFab *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 131-146): Springer.
- Gómez-Serrano, J., Espel, R., Grima, R., Burry, M. C., & Aguado, A. (2009). Evolution of the Formwork Used in the Temple of the Sagrada Família. *International journal of architectural heritage*, 3(2), 93-109. doi:10.1080/15583050802226470
- Gramazio, & Kohler. (2016). Gramazio Kohler Research. Retrieved from <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/index.html>
- Gramazio, F. (2014a). Gantenbein vineyard Façade. In F. Gramazio (Ed.), *The Robotic touch: How robots change architecture* (pp. 66-75): Park Books 2014.
- Gramazio, F. (2014b). *The Robotic touch: How robots change architecture*: Park Books 2014.

- Gramazio, F., & Kohler, M. (2008). Towards a digital materiality. *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*, 103-118.
- Gunay, Z., & Dokmeci, V. (2012). Culture-led regeneration of Istanbul waterfront: Golden Horn Cultural Valley Project. *Cities*, 29(4), 213-222. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.010>
- Halabi, M. (2015). The Sagrada Família.
- Hayes, Fai, S., Kretz, S., Ouimet, C., & White, P. (2015). Digitally-Assisted Stone Carving of a Relief Sculpture for the Parliament Buildings National Historic Site of Canada. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W3, 97-103. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W3-97-2015
- Hayes, Fai, S., & While, P. (2014). *Digitally-Assisted Stone Carving on Canada's Parliament Hill*. Paper presented at the Proceedings of the 32nd eCAADe Conference, Newcastle upon Tyne.
- HEIG-VD. (2016). Photogrammétrie Retrieved from <http://www.heig-vd.ch/ecg/domaines-de-formation/photogramm%C3%A9trie>
- Jang, H., Lee, S., & Choi, S. (2007). Optimization of floor-level construction material layout using Genetic Algorithms. *Automation in Construction*, 16(4), 531-545.
- King, N., Bechthold, M., Kane, A., & Michalatos, P. (2014). Robotic tile placement: Tools, techniques and feasibility. *Automation in Construction*, 39, 161-166.
- Kokorus, M., Eyrich, W., & Zacharias, R. (2016). *Innovative approach to the substation design using Building Information Modeling (BIM) technology*. Paper presented at the Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016 IEEE/PES.
- Kolarevic, B. (2014). Computing the performative *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 103-111): Routledge.
- Kolarevic, B., & Klinger, K. (2013). *Manufacturing material effects: rethinking design and making in architecture*: Routledge.
- Kostof, S. (1977). The practice of architecture in the ancient world: Egypt and Greece. *The architect: Chapters in the history of the profession*, 3-27.
- Lavigne, M. (2015). Portrait de métiers. *Continuité*(144), 28-31.
- Le Maléfan, I. (2014). Métiers d'art : la relève est-elle là? *Québec Hebdo*. Retrieved from <http://www.quebechebdo.com/Actualites/Societe/2014-07-21/article-3808082/Metiers-dart-%3A-la-releve-est-elle-la%3F1>
- Les-Forges-de-Montréal. (2011). Stage d'initiation aux techniques de Forge. *Association de mise en valeur du chateau de Coucy*. Retrieved from <http://www.lesforgesdemontreal.org/> website: <http://www.lesforgesdemontreal.org/wp-content/uploads/2013/02/les-ateliers-du-feu-11.pdf> Retrieved from <http://www.lesforgesdemontreal.org/wp-content/uploads/2013/02/les-ateliers-du-feu-11.pdf>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry* (Vol. 75): Sage Publications, Inc.
- McGee, W., de Leon, M. P., Willette, A., Brell-Cokcan, S., & Braumann, J. (2014). *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*: Springer.
- Menges, A. (2012). Morphospaces of robotic fabrication: from theoretical morphology to design computation and digital fabrication in architecture. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 28-47.

- Mnejja, H. E. (2010). *Modélisation des Mosquées Ottomanes « les mosquées à coupole de Sinan au 16ème siècle »*. (Mastère en architecture), Université 7 novembre à Carthage, Tunis. Retrieved from <https://www.dropbox.com/s/idpczvcd7no5zwq/Houssem%20Eddine%20Mnajja%20-%20Mod%C3%A9lisation%20des%20mosqu%C3%A9es%20Ottomanes.pdf?dl=0>
- Mnejja, H. E., & Tidaï, T. (2014). *Moyens numériques et conception architecturale : une approche pour gérer les connaissances - Modèles numériques et connaissances*. Paper presented at the Séminaire de conception architecturale Numérique, Luxembourg.
- Mnejja, H. E., & Tidaï, T. (2015, 2016). *Innover en s'innovant ou le retour du Maître Artisan*. Paper presented at the Transformer, innover, dérégler; Dixième colloque des Ateliers de la recherche en design, Faculté d'aménagement, Montréal.
- Mogas-Soldevila, L., & Oxman, N. (2015). *Water-based Engineering & Fabrication: Large-Scale Additive Manufacturing of Biomaterials*. Paper presented at the MRS Proceedings.
- MX3D. (2014). MX3D Bridge. Retrieved from <http://mx3d.com/projects/bridge>
- Nogent-le-Rotrou. (2014, 12/05/2014 à 08:16 par hugodeshors). L'artisanat, un métier en voie de disparition ? Retrieved from <http://www.le-perche.fr/31020/lartisanat-un-metier-en-voie-de-disparition/>
- Oxman, N. (2011). Variable property rapid prototyping: Inspired by nature, where form is characterized by heterogeneous compositions, the paper presents a novel approach to layered manufacturing entitled variable property rapid prototyping. *Virtual and physical prototyping*, 6(1), 3-31.
- Oxman, N., Laucks, J., Kayser, M., Tsai, E., & Firstenberg, M. (2013). Freeform 3D printing: Towards a sustainable approach to additive manufacturing. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, 479.
- Oxman, R. (2012). Informed tectonics in material-based design. *Design Studies*, 33(5), 427-455.
- Oxman, R. (2014). Informed tectonics in material-based design *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 225-250): Routledge.
- Oxman, R., & Oxman, R. (2014). *Theories of the Digital in Architecture*: Routledge.
- Parisel, & Tidaï, T. (1998). Le modèle en architecture dans un contexte informatique; redéfinitions ou proposition. Retrieved from <http://www.grcao.umontreal.ca/images/2.pdf>
- Patrimoine-histoire. (2008). Paris d'église en église. Retrieved from <http://www.patrimoine-histoire.fr/images/Patrimoine/Paris/eSteOdile/ParSOdile11.JPG>
- Pottmann, H. (2010). Architectural geometry as design knowledge. *Architectural Design*, 80(4), 72-77.
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers & Graphics*, 47, 145-164.
- Poulot, D. (2015). *Une histoire du patrimoine en Occident (XVIIIe-XXIe siècle): du monument aux valeurs*: Presses universitaires de France.
- Powell. (2011). *The great builders*: London : Thames & Hudson.
- Prigent, L. (2013). L'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO, les promesses d'un label?
- Rêve-de-pierre. (2006). la réalisation des moules. Retrieved from <http://www.reve-de-pierre.fr/fr/moules-elastomeres-silicone-RTV.php>.

- Richard, R. B. (2006). *Industrialized, flexible and demountable building systems: Quality, economy and sustainability*. Paper presented at the Proc. of Criocm 2006 International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate.
- Robert, P., Rey-Debove, J., & Rey, A. (1988). *Le petit Robert 1 : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. Paris: Le Robert.
- Robert, P., Rey, A., & Rey-Debove, J. (1993). *Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française : nouvelle édition remaniée et amplifiée*. Paris: Le Robert.
- Robots-in-Architecture. (2015). Photogrammétrie
Retrieved from <http://www.robotsinarchitecture.org/>
- Scheurer, F. (2010). Materialising complexity. *Architectural Design*, 80(4), 86-93.
- SCI-Arc. (2012).
- SCI-Arc Gehry Prize 2012 - Phantom Geometry - Kyle & Liz Von Hasseln/Advisors: Peter Testa & Devyn Weiser. Retrieved from <https://vimeo.com/51233342>
- Service-protestant-de-mission. (2014). Paris d'église en église. Retrieved from http://www.defap.fr/actualites/archives/2014/avril/tunisie-nouvelles-de-printemps-de-lecole-kallaline...-en-images/0414-victor-minard10.jpg/image_preview
- Shelby, L. R. (1964). The role of the master mason in mediaeval English building. *Speculum*, 39(03), 387-403.
- Siebenbrodt, M., & Schöbe, L. (2012). *Bauhaus*: Parkstone international.
- Stake, R. E. (2006). *Multiple case study analysis*: The Guilford Press New York.
- Stoecker, R. (1991). Evaluating and rethinking the case study. *The sociological review*, 39(1), 88-112.
- Suteau, M. (2013). Les artisans et le CAP: une conversion tardive (1920-2000). *Revue française de pédagogie*, 180(3), 43-52.
- Tanniou, É. (2012). La Belgique: au carrefour des théories européennes de la restauration. *Cahiers d'histoire*, 31(1), 111-117.
- Tidafi, T. (1996). *Moyens pour la communication en architecture : proposition de la modélisation d'actions pour la figuration architecturale*. Montréal: Université de Montréal.
- Trummer, A., Amtsberg, F., & Peters, S. (2013). Mill to Fit Rob| *Arch 2012* (pp. 110-117): Springer.
- UNESCO. (2012). Textes fondamentaux de la Convention de 2003 pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel.
- UNESCO, I. (1994). *ICOMOS: 1994*. Paper presented at the Document de la Conférence de Nara sur l'Authenticité dans le cadre de la Convention du Patrimoine Mondial, tenue à Nara, Japon.
- Vernieres, M., Patin, V., Mengin, C., Geronimi, V., Dalmas, L., Noel, J.-F., & Sang, J. T. K. (2012). Evaluation économique du patrimoine urbain: une approche par la soutenabilité.
- Warton, J., Dwivedi, R., & Kovacevic, R. (2014). Additive Manufacturing of Metallic Alloys *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 147-161): Springer.
- Whitehead, H. (2014). Laws of form *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 113-130): Routledge.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. London; New York: Routledge.
- Wujec, T. (2011). *Imagine design create*. New York, N.Y.: Melcher Media.
- Yastikli, N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 423-427.

Yin, R. (1989). Case study methodology. *Beverly Hills, CA: Sage.*